

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

Polo delle Scienze e delle Tecnologie



Facoltà di Ingegneria

Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici,  
di Trasporto e Territoriali

XXIV ciclo: Esame finale nell'Indirizzo “ Sistemi di Trasporto ”

Candidato

**Laura Mancini**

Titolo della Tesi

***Studio teorico-applicativo del decadimento delle caratteristiche superficiali  
di pavimentazioni aeroportuali: regolarità***

**Coordinatore di dottorato:**

Prof. Ing. Guelfo Pulci Doria

**Coordinatore di indirizzo:**

Prof. Ing. Bruno Montella

**Relatore:**

Prof. Ing. Bruna Festa

**Controrelatore:**

Prof. Ing. Alfonso Montella

*Ad*

*Alice.....*

*e tutta la mia famiglia.*

## INDICE

I	CAPITOLO .....	5
	INTRODUZIONE.....	5
1.1	MANUTENZIONE, RIABILITAZIONE E GESTIONE DELLE PAVIMENTAZIONI .....	5
1.2	OBIETTIVI DELLA RICERCA E PROBLEMATICHE CONNESSE .....	12
1.3	BREVE DESCRIZIONE DEL LAVORO PRESENTATO .....	14
II	CAPITOLO .....	16
	LA REGOLARITÀ IN CAMPO STRADALE E AEROPORTUALE: MODALITÀ DI MISURA E DI RESTITUZIONE.....	16
2.1	INTRODUZIONE .....	16
2.2	MODALITÀ DI MISURA DELLA REGOLARITÀ .....	21
2.2.1	classificazione dei metodi di misura dell'irregolarità secondo la World bank .....	30
2.3	RESTITUZIONE DEI PROFILI DI REGOLARITÀ .....	32
2.3.1	Rappresentazione del profilo nel dominio delle frequenze: PSD (Power Spectral Density) .....	34
III	CAPITOLO .....	38
	MODELLI DI DEGRADO .....	38
3.1	GENERALITÀ .....	38
3.2	RUOLO DELLE VARIABILI NEI MODELLI DI DEGRADO .....	41
3.3	PROPOSTA DI SVILUPPO DI UN MODELLO DI DEGRADO DI REGOLARITÀ .....	45
3.3.2	Caratterizzazione del traffico in termini di ricoprimenti equivalenti (NCeq) ..	46
3.3.1.1	Calcolo dei ricoprimenti .....	46
3.3.1.2	Criterio di equivalenza o omogeneizzazione del danno .....	48
3.3.1.3	Calcolo semplificato dei ricoprimenti equivalenti: <i>modello NCeq</i> .....	51
IV	CAPITOLO .....	55
	DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA .....	55
	PER L'ANALISI DEI PROFILI .....	55
4.1	PREMESSA.....	55
4.2	INDIVIDUAZIONE DELLA COMPONENTE DI REGOLARITÀ <i>TRANSIENTE</i> .....	59
4.2.2	Teoria della Media dei Quadrati ( <i>Mean Square, MS</i> ).....	60
4.2.3	Decomposizione Wavelet .....	64
4.3	RIMOZIONE DELLA COMPONENTE <i>TRANSIENTE</i> DAL PROFILO .....	69
4.3.4	Filtro a riduzione di contenuto spettrale (cutoff frequency) .....	70
4.3.5	Filtro creato ad <i>hoc</i> (K2).....	71
4.4	SEZIONAMENTO IN TRATTE OMOGENEE .....	72
4.4.1	Metodo di sezionamento dicotomico (francese).....	74
4.4.2	Verifica di stazionarietà delle tratte omogenee .....	76

V	CAPITOLO.....	77
	<i>APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA AD UN CASO STUDIO:</i> .....	77
	Analisi Dei Profili Acquisiti Sulla Pista Dell' Aeroporto "G.B.Pastine" di Ciampino .....	77
5.1	DESCRIZIONE DEL SITO INDAGATO .....	77
5.2	DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	79
5.3	ANALISI PRELIMINARI.....	80
5.3.1	Metodologie a confronto: Parte 1 .....	82
5.3.2	Risultati Metodologie a confronto: parte 1 .....	85
5.3.3	Metodologie a confronto: Parte 2 .....	88
5.3.4	Risultati Metodologie a confronto: parte 2 .....	90
5.3.4.1	Validazione del modello semplificato di calcolo dei ricoprimenti: <i>NCeq</i> .....	91
5.3.4.2	Studi ulteriori sul modello regressivo: <i>RMSVA</i> vs <i>ECs</i> .....	94
5.3.5	Metodologie a confronto: parte 3 .....	100
5.3.6	Risultati Metodologie a confronto: parte 3 .....	102
5.4	APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA OTTIMALE .....	103
VI	CAPITOLO .....	110
	<i>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</i> .....	110
	APPENDICE A.....	115
	CRITERI DEL METODO DICOTOMICO (FRANCESE).....	115
	APPENDICE B.....	119
	TEST DI <i>GOODNESS-OF-FIT</i> .....	119
	APPENDICE C.....	126
	PROCEDURA DI "SMOOTHING" SECONDO <i>ISO8608</i> .....	126
	BIBLIOGRAFIA .....	130

# **I      CAPITOLO**

## **INTRODUZIONE**

### **1.1 MANUTENZIONE,      RIABILITAZIONE      E      GESTIONE      DELLE PAVIMENTAZIONI**

La manutenzione delle pavimentazioni (B.U. 125/88 del CNR "Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale") è intesa come quel complesso di operazioni e attività che mirano a conservarne le caratteristiche funzionali e strutturali nell'arco del periodo di vita utile dell'infrastruttura, monitorando i parametri che possono rilevare l'andamento delle sue caratteristiche prestazionali.

Le pavimentazioni, in generale, sono sovente progettate per durare circa 20 anni (vita di progetto), ma già nei primi giorni dalla sua realizzazione inizia ad invecchiare. Quindi è probabile che se ci sarà una manutenzione ordinaria (rappezzi, trattamenti superficiali, etc), la vita effettiva dell'opera sarà assimilabile a quella di progetto, altrimenti sarà sicuramente minore. Se invece si attua una manutenzione straordinaria ( risanamento strutturale, etc.) la vita effettiva della sovrastruttura sarà probabilmente anche superiore a quella prevista. Alla luce di ciò quindi può essere fatto una distinzione tra:

- ✓ Manutenzione (*Maintenance*), con cui si intendono tutti i metodi e le tecniche utilizzati per preservare le condizioni della pavimentazione, la sicurezza, la qualità di marcia e quindi per garantirne la vita utile di progetto;
- ✓ Riabilitazione (*Rehabilitation*), intesa come il miglioramento strutturale o funzionale di una pavimentazione che comporta una sostanziale estensione della vita utile, attraverso un miglioramento delle condizioni delle pavimentazioni e delle qualità di marcia.

Gli effetti combinati dell'incremento di traffico e dell'ambiente, porteranno la pavimentazione verso il deterioramento nel tempo della stessa, non importa quanto ben progettata sia. La manutenzione e la riabilitazione (M&R) sono gli strumenti impiegati per

rallentare o azzerare questo processo di deterioramento. Sebbene la manutenzione possa rallentare il grado di deterioramento, non può fermarlo del tutto; quindi alla fine gli effetti del degrado devono essere contrastati con l'aggiunta o la sostituzione di materiale nella struttura pavimentazione esistente, e in tal caso quindi trattasi di riabilitazione.

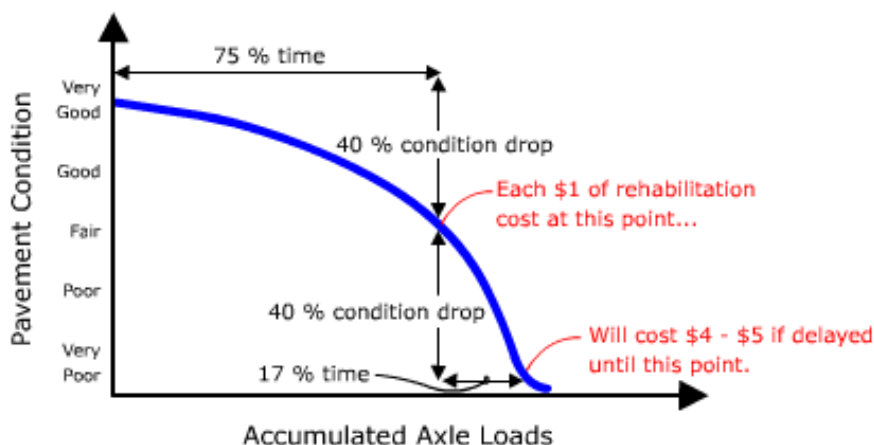
Gli effetti comuni che hanno le due tipologie di intervento, una volta messe in atto, sulla pavimentazione sono essenzialmente due:

- a) Lo stato della pavimentazione è migliorato;
- b) La velocità del degrado è globalmente alterata (ovvero diminuita).

In generale, la manutenzione può rallentare il tasso di deterioramento, andando a correggere i piccoli difetti che possono peggiorare e contribuire alla formazione di ulteriori difetti. Da un certo punto in poi, però, i difetti diventano troppo grandi da poter essere corretti con una semplice attività di manutenzione; per ripristinare tali difetti più gravi si interviene con la riabilitazione e ne consegue un netto miglioramento delle condizioni di pavimentazione. La misura in cui ciò si verifica dipende dal tipo di intervento (M&R), nonché dalla tempistica di tali azioni; in generale, l'intervento precoce sul degrado in atto con un piano sistematico che prevede la manutenzione e la riabilitazione è il più conveniente, dal punto di vista dei risultati (prolungamento della vita utile) e dal punto di vista economico.

La Figura 1. 1 illustra il concetto appena esposto: per il primo 75 per cento di vita della pavimentazione, si osserva un decadimento delle prestazioni della pavimentazione del 40 per cento circa; tuttavia, occorre solo un altro 17 per cento di vita della stessa, perché si tocchi in totale l'80 per cento di decadimento delle performance. Inoltre, al fine di ripristinare le condizioni della pavimentazione a un livello predeterminato, l'intervento costerà dalle 4 alle 5 volte in più se lo stato di degrado in cui l'opera versa, è avanzato di molto rispetto al punto ottimale di riabilitazione.

Si è introdotta così l'analisi dei costi del ciclo di vita della pavimentazione (Life-Cycle Costs Analysis), indicata come lo strumento in grado di identificare il miglior valore (il più basso costo a lungo termine che soddisfa l'obiettivo di prestazioni ricercato) per le spese di investimento.



**Figura 1. 1** Decadimento delle prestazioni. (Stevens, 1985)

Il risultato finale di tale analisi non è semplicemente la scelta di un'alternativa rispetto alle altre possibili, ma è la scelta della strategia di progetto più conveniente per una data situazione e di una maggiore comprensione dei fattori che influenzano l'efficacia dei costi; in termini di bilancio costi/benefici quindi è più logico agire attraverso un programma pianificato di manutenzione piuttosto che correre ai ripari quando ormai la sovrastruttura è compromessa e il danno è irreparabile.

Come risposta al crescente bisogno di manutenzione e riabilitazione delle pavimentazioni da un lato, essenzialmente dovuto a un incremento del traffico e quindi ad un invecchiamento precoce delle stesse, e alla contrazione delle risorse dall'altro, gli Enti Gestori e i Tecnici del settore hanno mostrato negli anni un interesse sempre maggiore a sviluppare un approccio di gestione più sistematico che includesse tutte le attività connesse con la pianificazione e programmazione, il progetto, la costruzione, la manutenzione e la riabilitazione della pavimentazione.

L'integrazione di tali attività è stata perseguita con l'ausilio di Sistemi di Gestione delle Pavimentazioni (PMS), il cui scopo è di fornire un metodo di selezione delle tecniche M&R di tipo completo, ben strutturato e solido, determinando le priorità e i tempi ottimali di intervento per attuare la riabilitazione, sviluppando i budget ad esse associati; prevedendo inoltre modelli di degrado della pavimentazione nel tempo.

Un PMS racchiude in sé una serie di strumenti o metodi che aiutano i decisori (ingegneri manutentori) nella ricerca di strategie ottimali per garantire il mantenimento delle pavimentazioni in una condizione accettabile per un determinato periodo di vita della sovrastruttura (Haas et al, 1994).

L'adozione del PMS come strumento di gestione per le pavimentazioni avviene intorno agli anni 70, inizialmente in ambito stradale, e solo dal 1995 in poi è stato adottato dai gestori aeroportuali (APMS); l'approccio sistemico ai problemi di manutenzione ha riscosso ampio successo negli Stati Uniti e in Canada, mentre in Italia ha trovato applicazione, seppur sporadica, molto più tardi.

Nel 2008, ad esempio, Aeroporti di Roma (ADR) ha iniziato l'implementazione di un sistema di gestione della manutenzione programmata delle pavimentazioni sulla base dei requisiti stabiliti dalle importanti Autorità di Aviazione Civile e Militare Internazionali (ICAO, FAA). ADR, con la collaborazione dell'Università di Pisa, della Società danese Dynatest, specializzata nella realizzazione di apparecchiature ad alto rendimento, e della GRS, specializzata in rilievi di regolarità e georeferenziazione, ha implementato un sistema di gestione delle pavimentazioni aeroportuali denominato A.I.R.P.O.R.T.S. (Airport Information Retrieval for Pavement Optimization Rehabilitation Treatment System), il quale utilizza modelli di calcolo prestazionali in grado di quantificare le condizioni di una pavimentazione, prevederne potenziali futuri problemi e suggerire la miglior strategia di manutenzione a breve, medio e lungo termine (Strade & Autostrade n°10, 2011).

È possibile individuare un'articolazione dei sistemi gestionali che risulti di applicabilità generale e che costituisca un riferimento per le amministrazioni che intendono svilupparne uno o migliorare quello esistente, ma non è possibile progettarne e realizzarne uno che abbia validità e applicabilità universale; ciascun gestore deve organizzare e implementare il sistema in base alle proprie esigenze e alle dimensioni dell'infrastruttura che deve gestire.

Le componenti basi che costituiscono un PMS/APMS sono essenzialmente cinque:

1. Rilievi, prevedono indagini sulla condizione delle pavimentazioni, attraverso campagne di misura;

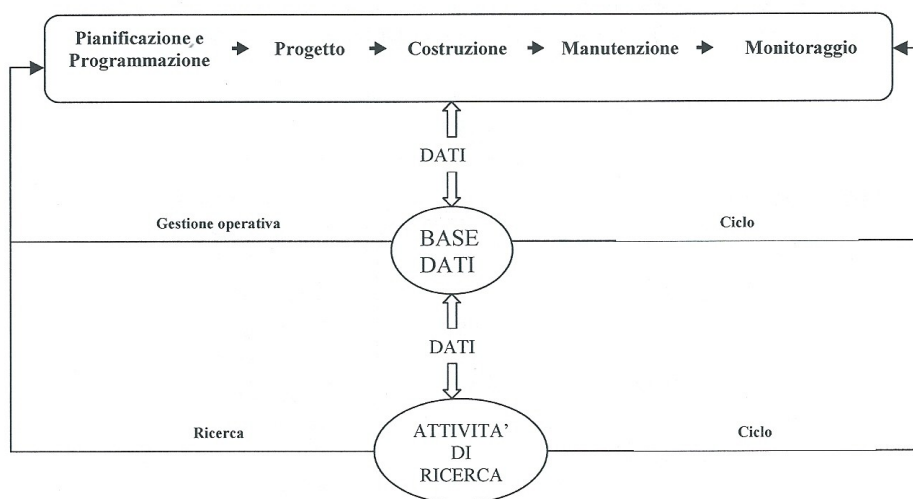


2. Banche Dati, sono database contenenti tutte le informazioni legate alle pavimentazioni raccolte nei rilievi; essi negli anni hanno assunto sempre maggiore importanza in quanto migliori sono le interfacce utenti, migliore sarà la consultazione e la manipolazione dei dati;
3. Schema di analisi, sono gli algoritmi adottati per interpretare in maniera significativa i dati delle banche dati; quindi permettono l'individuazione degli interventi alternativi, delle esigenze di manutenzione attuali e future, etc..
4. Criteri decisionali, sono quelle regole sviluppate per guidare le decisioni di gestione delle pavimentazioni; negli anni si sono evoluti, sono diventati sempre più complessi, per tener conto di un maggior numero di fattori. Tuttora sono in corso ricerche per sviluppare e affinare criteri decisionali adeguati e la possibilità di applicarli automaticamente.
5. Procedure di implementazione, sono i metodi utilizzati per applicare le decisioni di gestione alle sezioni di pavimentazione.

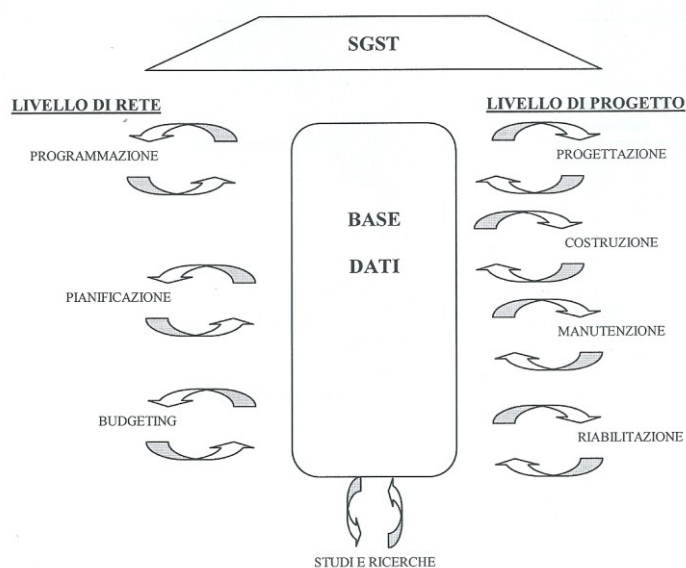
All'interno di un PMS/APMS è ben noto che l'elemento chiave è rappresentato dalla valutazione delle condizioni della pavimentazione, in quanto fornisce attraverso i rilievi, i dati che andranno a costituire i database su cui poi si incentrano tutte le analisi e le decisioni. Pertanto, si può concludere che la funzione di valutazione dello stato delle pavimentazione in un PMS è quella di misurare e analizzare i dati per verificare le previsioni di progettazione e di aggiornarle, se necessario; riprogrammare le misure di riabilitazione come indicato da queste previsioni aggiornate, migliorare modelli di progettazione, migliorare le pratiche di manutenzione e aggiornamento dei programmi di rete (Figura 1. 2).

I sistemi di gestione, in base agli obiettivi dell'attività di gestione che devono svolgere e quindi ai diversi interlocutori e fruitori cui sono rivolti, individuano al loro interno due livelli operativi tra loro integrati: livello di rete e livello di progetto. Il livello di rete ha come scopo primario quello di sviluppare la programmazione e la pianificazione delle attività di manutenzione, riabilitazione, ricostruzione e costruzione "ex novo" delle sovrastrutture stradali, per l'intera rete gestita. Il livello di progetto riguarda invece gli aspetti più

prettamente tecnici delle attività programmate e pianificate a livello di rete, prendendo in esame parti limitate della rete gestita ed ha come scopo quello di operare una scelta degli



**Figura 1. 2-**Struttura generale di un sistema di gestione per le sovrastrutture di trasporto.



**Figura 1. 3-**Struttura generale di un sistema di gestione per le sovrastrutture di trasporto.

interventi specifici, sviluppandone la progettazione (Figura 1. 3).

Lo stato della pavimentazione è valutato attraverso indici descrittivi, che normalmente includono dissesti, deflessione, regolarità e aderenza; questi sono indipendenti dalla metodologia scelta e dal criterio di ottimizzazione adottato e rappresentano il requisito base per un PMS.

Le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni giocano un ruolo di fondamentale importanza durante le operazioni a terra degli aeromobili, poiché sono in grado di influenzare fortemente i fenomeni connessi con le interazioni che si generano al contatto tra pneumatico e pavimentazione. Inoltre le manovre a terra degli aeromobili sono sempre da considerarsi delicate per quanto riguarda sia la sicurezza sia i costi di gestione.

Le tre principali caratteristiche strutturali/funzionali delle pavimentazioni aeroportuali che occorre monitorare con continuità temporale e spaziale sono la capacità portante, l'aderenza e la regolarità.

Questo lavoro tratterà in modo particolareggiato del monitoraggio delle caratteristiche di regolarità e della valutazione analitica dei suoi profili.

La regolarità della pista, come anticipato, è un parametro importante che non solo indica il livello del comfort di marcia, ma è anche legata alle vibrazioni che si generano negli aeromobili, alle velocità operative, al deterioramento delle gomme, ai costi di servizio, etc.. Una pavimentazione, che risulti strutturalmente in grado di sopportare le ripetizioni dei carichi dovute al traffico, può anche risultare funzionalmente inutilizzabile se ha una superficie irregolare e ammalorata.

In generale per *regolarità* della superficie di volo (*runway surface smoothness*) si intende l'assenza di ondulazioni che potrebbero interferire con le operazioni di decollo e atterraggio o compromettere l'integrità strutturale del velivolo, se abbastanza estese o severe. Tuttavia, piuttosto che misurare e valutare la regolarità superficiale, è pratica comune misurare la *irregolarità* della pista ( *runway surface roughness*) e compararla con gli standard o linee guida che ne specificano i valori soglia oltre i quali si rende necessario intraprendere azioni di rifacimento del manto superficiale così da conferire nuovamente regolarità alla pavimentazione oggetto di studio.

Il termine d'irregolarità superficiale quindi non dovrebbe essere confuso con quello di rugosità superficiale (scala fine), propriamente nota come macro e micro tessitura, le quali possono essere facilmente percepite al tatto facendo semplicemente scorrere una mano sulla superficie stessa.

È responsabilità quindi di ciascuna autorità aeroportuale monitorare la regolarità della pista; la cui misura rappresenta un'attività discreta, e non obbligatoria, spesso intrapresa in risposta a problemi noti di irregolarità o a seguito di lamentele ricevute da parte dei piloti, i quali per primi individuano aree di irregolarità lungo la pista, a seguito del disagio che avvertono a bordo in corrispondenza di esse durante le operazioni di volo.

Le pavimentazioni aeroportuali devono essere regolari e prive di qualsiasi tipo di irregolarità che potrebbe risultare dannosa per le operazioni degli aeromobili.

Per quanto fin qui esposto, appare evidente che una corretta misura e caratterizzazione della regolarità della pavimentazione rappresenti la base di partenza per poter intraprendere una qualsiasi attività nell'ambito di un PMS/APMS.

## **1.2 OBIETTIVI DELLA RICERCA E PROBLEMATICHE CONNESSE**

L'obiettivo primario del seguente lavoro è stato quello di caratterizzare la variabilità longitudinale e trasversale dell'irregolarità della pista di volo, analizzando le proprietà spettrali dei profili, al fine di ricavare modelli di regressione empirici e prevedere indici descrittivi ulteriori o più opportuni tra quelli comunemente in uso, studiandone le ricadute dell'interazione dinamica tra aeromobile e pavimentazione sugli indici suddetti.

Gli obiettivi secondari della ricerca, che sono in parte stati utili per il raggiungimento dell'obiettivo principale, possono riassumersi invece nei seguenti punti:

- Fornire un algoritmo semplificato che permetta di esprimere il numero di passaggi degli aeromobili in numero di ricoprimenti equivalenti,  $N_{eq}$ , in base al quale valutare il danno cumulato sulla pavimentazione in termini di degrado della regolarità.
- Formulare un protocollo per il rilievo, che consenta di garantire uniformità e ottimizzazione delle misure attraverso procedure e standard strumentali da definire puntualmente per le applicazioni aeroportuali in linea con i requisiti stabiliti dai regolamenti vigenti.

Il profilo stradale si considera alla stregua di un segnale digitale, per cui è stato necessario nell'analisi dello stesso ricorrere a metodi e principi fondamentali della Teoria dei Segnali.

Per una più efficace caratterizzazione della regolarità, si è ritenuto opportuno seguire una procedura step-by-step, al fine di individuare le due categorie in cui essa può essere identificata:

- Singoli eventi transienti (bumps/depressions);
- Irregolarità diffusa, associata alla componente stazionaria.

Impiegando quindi le diverse metodologie di individuazione e rimozione transienti, e successivamente effettuando il sezionamento in tratte omogenee, è stata svolta un'analisi comparativa dei risultati ottenuti, al fine di individuare la metodologia ottimale che fornisce:

- ✓ il minor numero di transienti;
- ✓ il minor numero totale di tratte omogenee;
- ✓ il massimo numero di tratte stazionarie.

Operare su un numero minimo di transienti, vuol dire “modificare” poco il profilo, preservandone per quanto più possibile il contenuto spettrale iniziale. Riuscire a suddividere il profilo, depurato dei transienti, in un numero contenuto di tratte stazionarie, vuol dire manipolare con maggiore facilità le informazioni raccolte, rendendo più celeri le operazioni di analisi. Infine è sempre auspicabile riuscire ad ottenere il 100% di tratte stazionarie, per cui l'obiettivo principale è stato quello di massimizzare il numero di tratte individuate che fossero anche stazionarie. Dopo si è potuto procedere allo sviluppo di modelli di degrado empirico; soprattutto in ambito aeroportuale la caratterizzazione della variabilità della regolarità nella direzione trasversale può consentire di pervenire allo sviluppo dei modelli suddetti sfruttando il degrado differenziale causato dalla distribuzione trasversale delle traiettorie degli aeromobili sulla pista e quindi il differente numero di ricoprimenti cui la pavimentazione è sottoposta.

### **1.3 BREVE DESCRIZIONE DEL LAVORO PRESENTATO**

. In generale, la regolarità è una caratteristica fondamentale sia dal punto di vista dell'utenza, poiché da essa dipendono il comfort, ma soprattutto, la sicurezza della guida, sia dal punto di vista dell'ente proprietario della strada, perché dalla regolarità dipende la pianificazione della manutenzione della rete viaria, con tutti i pesi economici che essa comporta. Una completa definizione delle caratteristiche ed azioni del traffico da monitorare costituisce una delle condizioni di riferimento necessarie ad un approccio al progetto e soprattutto alla manutenzione delle pavimentazioni stradali e aeroportuali che permetta di effettuare la stima delle prestazioni di una sovrastruttura contenendo l'errore massimo entro valori accettabili sotto prestabiliti livelli di confidenza. I risultati del presente lavoro di ricerca contribuiscono a fornire un nuovo approccio per l'analisi dei profili longitudinali delle pavimentazioni in ambito aeroportuale.

Un punto importante nello svolgimento della tesi è stato l'individuazione della metodologia ottimale volta alla caratterizzazione della regolarità, attraverso cui è possibile identificare le due componenti principali in cui può essere suddivisa l'irregolarità delle piste aeroportuali: singolarità (bumps) e irregolarità diffusa. La procedura prevede due fasi di analisi, la prima di localizzazione e rimozione delle singolarità puntuali e una seconda fase in cui il profilo depurato così ottenuto è analizzato allo scopo di valutare l'irregolarità diffusa (e.g. RMSVA).

Inoltre è stata proposta una nuova metodica per lo sviluppo di modelli di degrado della regolarità delle piste aeroportuali al fine di migliorare statisticamente la stima dei parametri regressivi e introdurre variabili indipendenti che catturano in modo esaustivo l'interazione aeromobile/pavimentazione. È stato introdotto quindi il numero di ricoprimenti equivalenti,  $Neq$ , per rappresentare il danno indotto dallo spettro di traffico aereo; si ritiene opportuno fare un'analisi preliminare dei ricoprimenti allo scopo di valutare le traiettorie più frequenti lungo le quali si attingono i massimi valori di irregolarità.

In tal modo è possibile indirizzare e gestire in modo ottimale le operazioni di monitoraggio e soprattutto di misura dei profili. L'unione quindi delle informazioni riguardanti il traffico aereo con una esaustiva rappresentazione della irregolarità lungo lo sviluppo totale della pista, può rappresentare un valido strumento per lo sviluppo di modelli di degrado più efficienti, soprattutto all'inizio della vita utile di una pavimentazione di volo, oltre a fornire una più efficace descrizione della variabilità longitudinale e trasversale della regolarità. Si ritiene altresì importante far osservare che, applicando le varie metodologie proposte ad un caso studio (G.B.Pastine, Ciampino-Roma), si è pervenuti ad un modello di previsione che esula da quelle che sono le caratteristiche dei materiali degli strati che compongono la pavimentazione indagata, quindi è opportuno calibrare il degrado della regolarità su differenti piste aeroportuali per la specifica pavimentazione.

## II CAPITOLO

### LA REGOLARITÀ IN CAMPO STRADALE E AEROPORTUALE: MODALITÀ DI MISURA E DI RESTITUZIONE

#### 2.1 INTRODUZIONE

Secondo la Norma ISO 13473- Parte1 “ *Determination of Mean Profile Depth* ” si definisce tessitura di una pavimentazione stradale lo scostamento della superficie reale da un piano di riferimento (ISO 13473,1997).

Partendo dall’osservazione che il profilo superficiale può essere scomposto in una serie di funzioni sinusoidali di determinate lunghezze d’onda  $\lambda$  ed ampiezze  $h$ , nel corso del XVIII Congresso Mondiale di Strade (Bruxelles, 1987), il Comitato Tecnico delle Caratteristiche Superficiali dell’AIPCR ha proposto la classificazione delle caratteristiche geometriche superficiali della pavimentazione stradale come riportata in Figura 2. 1; si fa riferimento alla lunghezza d’onda  $\lambda$  delle asperità ed alla relativa ampiezza  $h$ , ritenuta quest’ultima la dimensione caratteristica del profilo nella direzione ortogonale alla sovrastruttura, distinguendo quattro classi fondamentali in funzione dei domini di pertinenza delle lunghezze d’onda. È pertanto possibile individuare le seguenti classi: Irregolarità, Megatessitura, Macrotessitura, Microtessitura (Figura 2. 2). Questa classificazione permette di identificare e collegare in maniera molto chiara, tutti i campi di lunghezza d’onda a tutti i fenomeni di interazione veicolo-pavimentazione influenzati dalla tessitura.

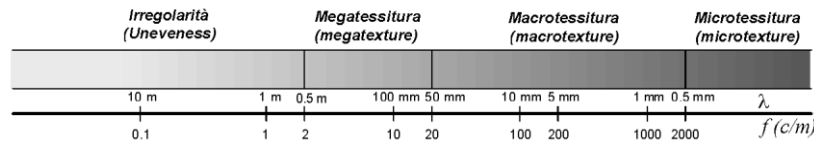
Le irregolarità della superficie stradale dominano il processo di generazione del fenomeno vibratorio.

Si definisce in genere, *irregolarità* una lunghezza d’onda  $\lambda > 0.5$  e *tessitura* una  $0.5 \text{ mm} < \lambda < 0.5 \text{ m}$ . Alla predetta scala è associabile una scala delle frequenze spaziali mediante la relazione  $f = 1/\lambda$ . Esiste una corrispondenza tra la lunghezza d’onda  $\lambda$  e il periodo  $T$ . Poiché il periodo è  $T = 2\pi/\omega$ , la lunghezza d’onda  $\lambda = 2\pi/\Omega$  e un veicolo, in moto rettilineo uniforme, impiega il tempo  $T = \lambda/V$  per coprire una lunghezza d’onda  $\lambda$ , si può derivare che:



DOMINIO	INTERVALLO DI DIMENSIONI	
	ORIZZONTALE	VERTICALE
MICROTESSITURA	0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
MACROTESSITURA	0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
MEGATESSITURA	50 - 500 mm	1 - 50 mm
REGOLARITA' SUPERFICIALE		
ONDE CORTE	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
ONDE MEDIE	5 - 15 m	5 - 50 mm
ONDE LUNGHE	15 - 50 m	10 - 200 mm

**Figura 2. 1** Classificazione delle caratteristiche superficiali in termini di  $\lambda$  ed ampiezza  $h$ .(AIPCR).



**Figura 2. 2** Classificazione delle caratteristiche superficiali in termini di  $\lambda$  (o  $f$ ).

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot \frac{V}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} = V \cdot \Omega \\ \omega &= 2 \cdot \pi \cdot f \end{aligned} \right\} \Rightarrow f = \frac{V}{\lambda}$$

Pertanto, a grandi lunghezze d'onda corrispondono, nel dominio del tempo, basse frequenze e a piccole lunghezze d'onda corrispondono alte frequenze.

In funzione della loro importanza (altezza e lunghezza) e della velocità del veicolo, le irregolarità superficiali agiranno (messa in vibrazione) al livello di frequenza della massa sospesa (scocca), influenzando il comfort di marcia, al livello della massa non sospesa (sistema ruote/sospensioni) o dei pneumatici, influenzando la sicurezza a causa del deterioramento del contatto pneumatico-pavimentazione (quest'ultimo livello di risonanza, non essendo avvertito dall'utente, può essere estremamente pericoloso).

La sensibilità del corpo umano alle accelerazioni e alle vibrazioni è stata ampiamente analizzata e quantificata in diversi studi. È stato pertanto dimostrato che il corpo umano tollera poco le accelerazioni verticali con frequenza intorno ai 5 Hz; le frequenze delle vibrazioni indotte dal traffico veicolare sono comprese tra 1-50 Hz.

Considerando le possibili velocità dei veicoli, si può affermare che le lunghezze d'onda d'interesse sono soprattutto quelle che caratterizzano la megatessitura e le irregolarità.

La stessa norma ISO 13473-1 definisce l'irregolarità come la deviazione della superficie, rispetto ad un piano di riferimento, con dimensioni caratteristiche, in senso longitudinale, che variano nell'intervallo 0.5 m a 50 m.

In accordo con ASTM E 867-94, l'irregolarità, dal punto di vista tecnico, è definita come “la deviazione della superficie reale della pavimentazione da un ideale piano di riferimento, con dimensioni caratteristiche che influenzano la dinamica del veicolo, la qualità di guida e i carichi dinamici”.

In altre parole, la regolarità si può definire come quella caratteristica superficiale la cui misura indica il mantenimento della quota dei piani di progetto ossia la continuità del profilo in tutte le sue direzioni.

Nelle irregolarità superficiali rientrano i difetti superficiali di “ampia scala”: avvallamenti, ondulazioni, dislivelli ( dovuti ad un adattamento topografico).

Secondo la natura dei difetti superficiali, le forze che si generano sul veicolo possono dar luogo a moti parassiti, quali l'amplificazione del moto di rollio. In curva, ad esempio, il veicolo è fortemente sollecitato, e le irregolarità superficiali sono tanto più pericolose, dal momento che i moti generati danno luogo ad una ripartizione irregolare degli sforzi sulle ruote causando una destabilizzazione del veicolo e rendendo, di conseguenza la sua traiettoria più difficile da controllare.

La loro formazione può scaturire da carenze strutturali dovute a errori in sede progettuale, all' insussistenza dei necessari requisiti di qualità dei materiali costituenti la miscela, o a tecnologie inadeguate nella posa in opera. Gli effetti che esse possono avere in ambito aeroportuale sono pressoché identici a quelli che si osservano in ambito stradale ovvero cedimenti del sottofondo della sovrastruttura viaria e della fondazione, oltre che a fenomeni di crisi meccanica interni alla sovrastruttura.

A tale categoria appartengono anche le irregolarità in direzione trasversale al profilo, definite *ormaie*, che spesso impediscono il normale deflusso delle acque meteoriche,

determinando ristagni d'acqua con conseguente riduzione della visibilità a causa dello spray originato dalle ruote in movimento, e condizionano le qualità frenanti dei veicoli, dato che l'aderenza impegnabile risulta molto variabile.

Un altro aspetto particolarmente importante riguarda l'influenza delle irregolarità superficiali sul processo di degradazione della sovrastruttura: quanto più diffuse sono le irregolarità, tanto più veloce sarà il decadimento strutturale. Ciò è dovuto agli incrementi localizzati di forze e azioni dinamiche irregolari conseguenti alla distribuzione anomala dei carichi sulla pavimentazione.

Le suddette considerazioni in merito all'influenza della regolarità nei confronti della sicurezza e del confort di marcia hanno validità generale sia in campo stradale e sia in campo aeroportuale, seppur in misura diversa.

Anche in campo aeroportuale, la regolarità superficiale delle pavimentazioni delle piste di volo, insieme alla capacità portante e al livello di aderenza delle stesse, costituisce una parte essenziale della sicurezza aerea.

In tale contesto, la regolarità è un concetto legato essenzialmente alla sicurezza delle operazioni di volo e in minor misura al discomfort dei passeggeri, giacché il tempo di esposizione di questi ultimi al rumore, alle accelerazioni e decelerazioni verticali trasmesse per effetto dell'interazione velivolo-pavimentazione è davvero molto basso (pochi secondi) al contrario delle pavimentazioni stradali dove invece la regolarità è misurata in termini di confort di marcia sperimentato dagli utenti della strada. Inoltre essa va assumendo sempre maggiore rilievo nella valutazione della funzionalità della sovrastruttura in termini di aderenza pneumatico-pavimentazione, in termini di dinamica del veicolo e in termini di sovraccarichi dinamici trasmessi alla pavimentazione.

Riguardo alle prescrizioni sulla regolarità delle pavimentazioni aeroportuali, sia la Federal Aviation Administration (FAA) che l'International Civil Aviation Organization (ICAO) forniscono attualmente delle direttive molto semplificate, in cui sono indicate i valori di ampiezze massime associabili ad una data lunghezza d'onda di riferimento:

ICAO (pavimentazioni nuove) ampiezza 3 mm, lunghezza d'onda 3,00 m;

FAA (pavimentazioni in CB) ampiezza 6,35 mm, lunghezza d'onda 3,66 m;

FAA (pavimentazioni in CLS) ampiezza 6,35 mm, lunghezza d'onda 4.88 m;

Gli aeromobili rispondono all'irregolarità diversamente dai veicoli stradali, in quanto sono caratterizzati da pesi e da velocità operative molto superiori. Anche in tal caso le irregolarità quindi possono determinare nelle varie parti dell'aeromobile, dei valori di accelerazione che superano certi limiti di tollerabilità per l'uomo.

In campo aeroportuale il limite di tollerabilità delle accelerazioni verticali per l'uomo è stato individuato in  $\pm 0.4$  g costante nel campo di frequenze tra 2 e 20 Hz e per una durata di almeno 5 minuti. (Gherardi, 1978) (ICAO, 2002). La distribuzione in frequenze e l'entità delle accelerazioni verticali che si manifestano durante le manovre a terra degli aeromobili, può essere allora considerata come un parametro di valutazione per le irregolarità delle pavimentazioni. L'entità di tali accelerazioni, variabile a seconda della parte strutturale dell'aereo che si considera, è dovuta sia alla distribuzione delle ampiezze della pavimentazione nel dominio delle frequenze spaziali sia alle frequenze proprie di risonanza dell'aereo.

La risposta dell'aeromobile alla irregolarità della pista (Hachiya et al, 1999; Calautti et al, 2004; Transport Canada 2005) è funzione dell'altezza e dell'ampiezza dell'irregolarità, e della sua posizione lungo il profilo; la presenza infatti di combinazioni multiple, in successione o anche sovrapposte di essi ne amplifica gli effetti individuali nei confronti della regolarità. È stato dimostrato (Hachiya et al, 1999) che l'accelerazione verticale del velivolo aumenta all'aumentare dell'ampiezza della singolarità. Inoltre la risposta del velivolo risulta funzione del tipo di aeromobile, del peso dello stesso, della portanza raggiunta e della velocità con cui esso impatta con l'irregolarità durante le operazioni di decollo o atterraggio.

Altro aspetto fondamentale da considerare nel valutare l'irregolarità è il fenomeno della risonanza (Calautti et al, 2004): un'irregolarità puntuale (o una serie di esse) che viene intercettata dall'aeromobile, anche se di ampiezza relativamente ridotta, ad una velocità che

concorda con le frequenze naturali dello stesso velivolo, può causare una significativa risposta in risonanza dell'aeromobile. Nei confronti di tali aspetti, anche le case costruttrici di aeromobili hanno da sempre mostrato notevole interesse nei riguardi dei fenomeni di interazione aereo/pavimentazione e in particolar modo sulla regolarità delle piste.

Esse molto spesso, si affidano a modelli di simulazione agli elementi finiti, per valutare e verificare il comportamento dinamico e la resistenza a fatica delle parti più sollecitate degli aeromobili nei confronti dell'irregolarità delle pavimentazioni delle piste di volo.

## **2.2 MODALITÀ DI MISURA DELLA REGOLARITÀ**

L'importanza del rilievo del profilo della pavimentazione e quindi della tessitura superficiale è senza dubbio correlata a quei fenomeni fisici che scaturiscono dall'interazione pneumatico-pavimentazione, in particolar modo agli effetti che tale interazione comporta. Infatti la tessitura, intesa come l'aspetto geometrico delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni, gioca un ruolo importante in obiettivi determinanti della progettazione stradale quali la sicurezza, il costo, il comfort di marcia e l'impatto ambientale della sovrastruttura, che si traducono, in fase di esercizio, nella qualità e nel bilancio energetico del contatto dinamico ruota-strada.

Nell'ambito di tale contatto, le caratteristiche superficiali del piano di via partecipano alla generazione di effetti quali aderenza, vibrazioni, resistenza e rumore di rotolamento, pertanto è particolarmente sentita l'esigenza di attendibili metodologie di rilievo.

L'esplicitazione e la codifica dei legami funzionali fra la causa "tessitura" e gli "effetti" generati trovano una pratica ed evidente rappresentazione in "Indicatori" del piano di via, proposti in sede internazionale.

Le metodologie di caratterizzazione della tessitura superficiale mediante i suddetti Indicatori possono essere raggruppati in due distinte classi:

- 1 Criteri di tipo *estrinseco*, cioè finalizzati all'analisi della tessitura tramite indicatori ad essa correlabili. Tra questi si possono annoverare il metodo di misura dell'attrito radente con apparecchio a pendolo e il metodo del drenaggio con permeametro;
- 2 Criteri di tipo *intrinseco*, cioè legati al rilievo e alla rappresentazione dell'andamento geometrico superficiale di una porzione del piano di via, espresso mediante funzioni discrete del profilo ( $z=f(x)$ ) e della superficie ( $z=f(x,y)$ ), in base alla strumentazione adoperata per il rilievo. Tali criteri consentono quindi di individuare, a seguito di elaborazioni numeriche di tali funzioni, indicatori della "tessitura" superficiale quale grandezza prettamente geometrica e possono a loro volta essere organizzati in due sottoclassi in funzione delle post-elaborazioni a cui le grandezze rilevate, in particolar modo i profili  $z(x)$ , vengono sottoposti; in tal senso si hanno:

**b.1** *descrittori disaggregati* (o spazio frequenziali) il cui contenuto informativo, attraverso la spettralizzazione delle ampiezze, è riferito ad una specifica classe di lunghezze d'onda;

**b.2** *descrittori aggregati*, presso i quali il valore fornito fa riferimento al complesso delle lunghezze d'onda e relative ampiezze, costituenti la superficie indagata.

Alla luce di quanto detto, le metodiche di rilievo sono direttamente connesse con l'indicatore o la classe di indicatori alla cui esplicitazione sono rivolte. Esse sono organizzabili in due ampi gruppi:

1. Metodi di valutazione soggettiva
2. Metodi di valutazione oggettiva

Al primo gruppo appartengono tutti i tipi di approcci soggettivo, secondo cui un gruppo di persone selezionate (subjective panel rating) esprimono un proprio giudizio circa il livello di comfort avvertito durante la percorrenza di un determinato tratto stradale; tali opinioni poi vengono convertite in una scala numerica. Anche in ambito aeroportuale sono documentati studi finalizzati alla valutazione del comfort di marcia e della sicurezza delle operazioni, sulla base dei giudizi di valutazione soggettiva dei piloti, attraverso la compilazione da parte di questi ultimi di appositi questionari (Hachiya et al, 1999).

Questi tipi di indagini forniscono indici non trasportabili nel tempo (e.g. Present Serviceability Rating, *PSR*), poiché sono diversi i fattori che possono influire sulla ripetibilità e sull'errore di stima, quali la tipologia e dimensione del veicolo o velivolo impiegato, la numerosità del gruppo di valutazione; inoltre risultano essere dispendiosi in termini sia economici che di tempo, quindi per tale motivo non sono raccomandati come strumenti di investigazione primaria delle irregolarità stradali o aeroportuali.

Nell'ambito dei metodi di valutazione oggettiva, invece, la misura della tessitura può essere definita:

- Diretta, quando si valuta, limitatamente ad una porzione superficiale, l'entità della variazione verticale della superficie rispetto al piano di riferimento, attraverso strumentazioni semplici che forniscono una misura media dell'entità dello scostamento rispetto al suddetto piano (e.g. metodi volumetrici) oppure mediante strumentazioni più sofisticate che forniscono dei profili longitudinali e/o trasversali di pavimentazione (e.g. profilometri). Quest'ultima misurazione è quella che contiene il maggior numero di informazioni, quindi consente di ottenere una rappresentazione delle proprietà geometriche superficiali, in tutto il dominio della frequenza spaziale di interesse per le scienze stradali, attraverso l'analisi armonica generalizzata;

- Indiretta, quando invece è riferita ad una proprietà legata alla stessa tessitura stradale, mediante indici sintetici ( *Mean Texture Depth*, *Mean Profile Depth*, *International Roughness Index*), nell'ambito di un singolo e ristretto campo del dominio delle frequenze spaziali.

Negli ultimi anni hanno riscontrato maggiori consensi i sistemi di rilievo di tipo diretto, in particolar modo quelli che risalgono agli indicatori di tessitura attraverso l'analisi del profilo, inteso quest'ultimo come elemento bidimensionale, intersezione della superficie stradale con un generico piano a essa perpendicolare.

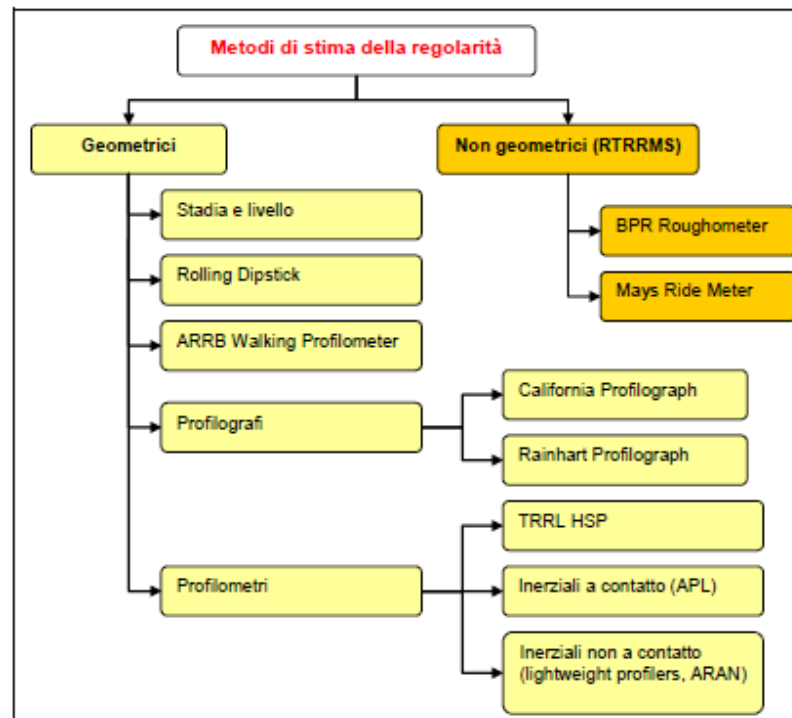
In letteratura con il termine *profiler* viene indicato un qualsiasi strumento utilizzato per misurare i profili stradali. Per ottenere informazioni riguardo alle irregolarità superficiali a partire da un profilo misurato, devono esistere due condizioni di base:

- a) Lo strumento deve essere capace di captare le informazioni rilevanti presenti in un vero profilo;
- b) Bisogna essere forniti di un valido algoritmo in grado di elaborare i valori misurati con lo strumento suddetto, per estrarre le informazioni desiderate sottoforma di un indice che riassume le condizioni di irregolarità del profilo indagato.

I dispositivi disponibili per la misura del profilo (Figura 2. 3) possono essere classificati, in base ai principi su cui si basano per il rilievo della regolarità; che sono sostanzialmente due:

- ✓ Quello di tipo “*non geometrico*”, con il quale le misure sono ricavate per la valutazione dell'effetto dinamico che la regolarità della pavimentazione ha sul veicolo (che viaggia a velocità costante), in termini di accelerazioni verticali;
- ✓ Quello di tipo “*geometrico*”, che si basa sulla misurazione diretta o indiretta dei punti di elevazione dalla superficie e che costituiscono il profilo longitudinale rispetto al piano approssimante la superficie stradale.





**Figura 2. 3** Tecnologie di rilievo dei profili di regolarità

I sistemi non geometrici sono definiti col termine Response-Type Road Roughness Measuring Systems (RTRRMS). Sono costituiti da un trasduttore di spostamento che rileva gli incrementi di movimento asse-corpo del mezzo su cui sono installati, che può essere un'automobile oppure un rimorchio trainato. Tra questi si annoverano: il Roughmeter o Bump Integrator e il Mays Meter. L'utilizzo di tali apparecchiature ha lo svantaggio che i sistemi di misura sono dipendenti dalle prestazioni dei sistemi di sospensione sui quali essi sono montati; ciò comporta una non stabilità nel tempo, per cui le misure attuali non possono essere confrontate con quelle fatte diversi anni fa. Inoltre le misure effettuate con tali dispositivi non sono trasportabili, cioè le valutazioni fatte con un sistema sono raramente riproducibili da un altro sistema. Essi sono stati quasi del tutto rimpiazzati dai profilometri laser, soprattutto negli ultimi decenni.

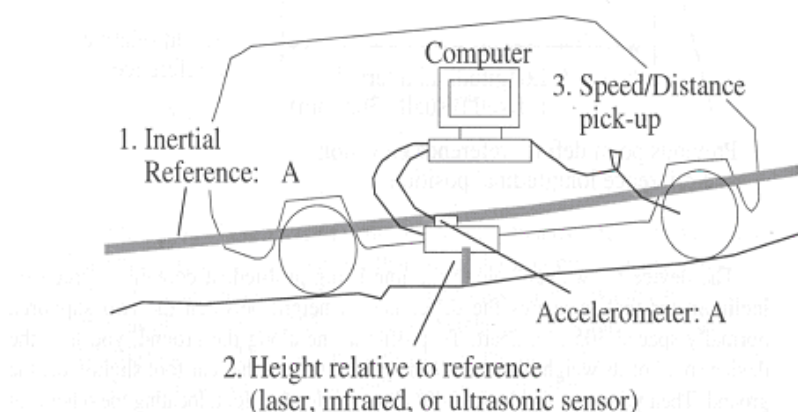
I sistemi geometrici, a loro volta, possono essere invece classificati in :

- ✓ Profiler di Classe 1
- ✓ Profiler di Classe 2

Tra gli strumenti di Classe1, la stadia e livello (rod and level) è forse il metodo più accurato per avere le misure delle elevazioni effettive della superficie stradale e si classifica tra i metodi statici, poiché gli strumenti sono fissi a terra quando viene effettuata la misura. Tuttavia misurare un profilo con tale tecnica richiede procedure speciali che rendono il processo estremamente costoso e che richiedono tempo. Inoltre, i passi di campionamento per ottenere una misura di profilo valida per computare un indice di irregolarità sono abbastanza restrittivi, si parla di intervalli inferiori ad un piede (foot) e quindi i tempi di rilievo risulterebbero non accettabili, motivo principale per il quale si adottano intervalli di campionamento non inferiori ai 300 mm con tale strumentazione (W. Sayers et alii,1997).

A questa famiglia di strumenti appartiene il *Dipstick*, che può essere definito come la versione evoluta di un inclinometro portatile, in quanto misura la differenza in altezza tra i due supporti su cui poggia lo strumento; la distanza tra tali supporti (passo) varia da un minimo di 7.5 cm fino ad un massimo di 30,5 cm.

Tra i dispositivi di Classe 2 invece ci sono i profilometri inerziali (Figura 2. 4), frutto dello sviluppo della tecnologia laser degli ultimi decenni, e forniscono un rilevante contributo nella caratterizzazione della tessitura superficiale dei manti stradali in termini di precisione e di integrazione con sistemi software di gestione (Sayers, Gillespie e Paterson ,1986).



**Figura 2. 4** Schematizzazione di un profilometro inerziale

Con questo tipo di strumento si riescono a registrare in continuo profili longitudinali di tessitura e regolarità della superficie stradale, su cui sarà possibile andare a valutare indicatori di macrotessitura e di regolarità.

I profilometri inerziali sono classificati dalle Norme ISO 13473-3 “ *Characterization of pavement texture utilising surface profile — Part 3: Specification and classification of profilometer* ” in relazione a diverse caratteristiche fra cui le più rilevanti sono:

- ❖ la natura di contatto tra strumento e superficie da testare, e quindi sono suddivisi in *dispositivi a contatto e dispositivi non a contatto*;
- ❖ il principio di funzionamento del dispositivo di rilievo, distinguendo:
  - *profilometri laser*;
  - *profilometri a sezione di luce*;
  - *profilometri a ultrasuoni*.

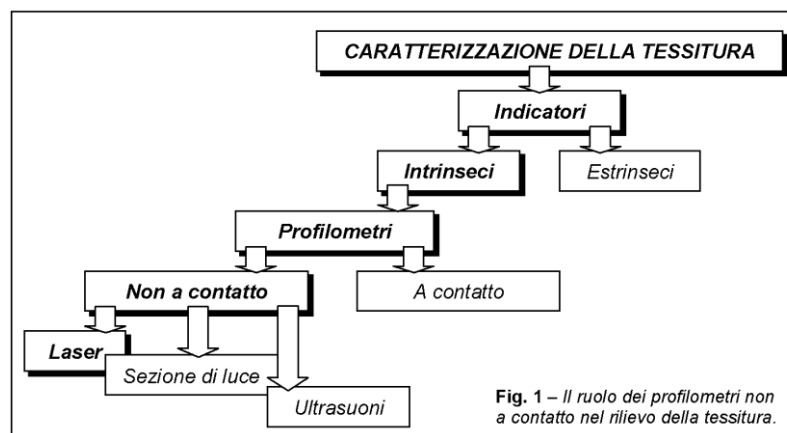


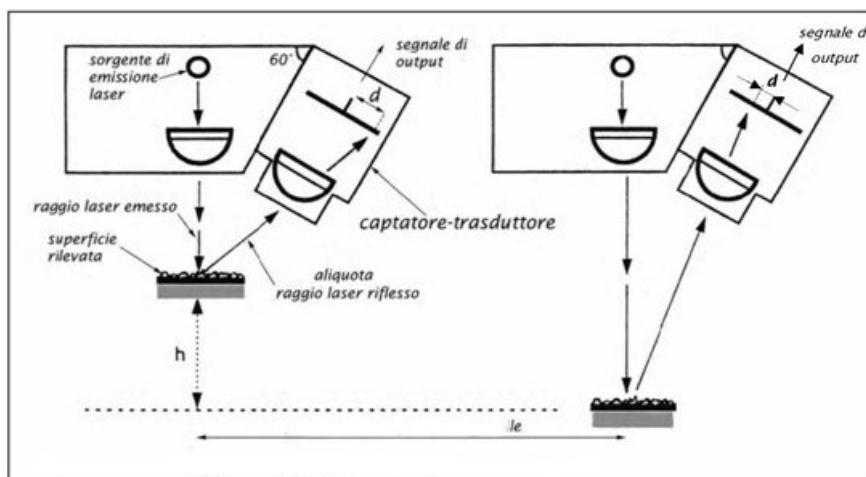
Fig. 1 – Il ruolo dei profilometri non a contatto nel rilievo della tessitura.

**Figura 2. 5** Ruolo dei profilometri non a contatto nel rilievo della tessitura

La concezione del più comune profilometri laser si fonda sul principio ottico della triangolazione: la sorgente di emissione genera un raggio formante un certo angolo di incidenza con la pavimentazione, generalmente 90°; il captatore, rappresentato da un semiconduttore foto-sensibile, negli strumenti di prima generazione è posto inclinato rispetto alla direzione del raggio emesso e raccoglie un'aliquota di raggio riflesso dalla

pavimentazione trasmettendola, in seguito a filtraggio per mezzo di una lente, al trasduttore per la trasformazione del segnale luminoso.

L'insieme *sorgente-captatore-trasduttore* restituisce, come dato di output, la distanza  $d$  sul captatore (Figura 2. 6); lo spostamento dell'intero complesso di emissione-raccolta del raggio laser lungo una direzione parallela alla superficie stradale, ad esempio a mezzo di un veicolo, consente di associare, con l'ausilio di una centralina di controllo e/o software di gestione, ad ognuna delle altezze  $h$  (distanza fra la superficie da rilevare ed emissore), una coordinata  $x$  rappresentativa della posizione del punto rilevato.



**Figura 2. 6** Principio di funzionamento del profilometro laser.

Si ottiene in tal modo un insieme di coppie di valori altezza-posizione costituente un profilo  $z(x)$  discretizzato; generalmente lo spostamento lungo  $x$  viene effettuato per incrementi discreti costanti. È intuibile come al diminuire dell'entità del passo di scansione aumenti la qualità percettiva dello strumento e quindi la precisione del rilievo: il profilo restituito si approssima al profilo reale analizzato.

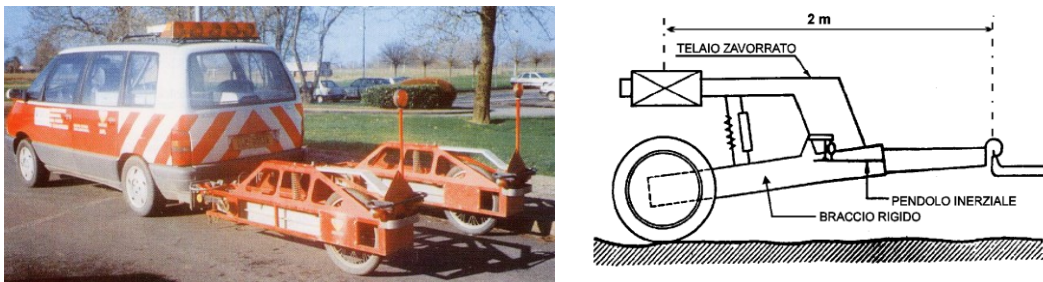
Tra l'ampia scelta di sistemi inerziali attualmente in uso nei Paesi del mondo si citano i seguenti: l'APL e l'ARAN.

L'APL ( Longitudinal Profile Analyzer ) è stato sviluppato dal Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ( LCPC ) si presenta sottoforma di un rimorchio monoruota, che viene

trascinato a velocità costante, da un'autovettura (Figura 2. 7). Il veicolo di misura è dotato in genere di due rimorchi APL; in tal modo è possibile valutare la regolarità geometrica lungo due allineamenti nell'ambito di una corsia. Il riferimento inerziale è fornito da un pendolo inerziale a bassa frequenza "pseudo orizzontale", il quale misura gli spostamenti verticali subiti dalla ruota di misura; un trasduttore degli spostamenti è posizionato tra il pendolo e il braccio che trascina la ruota, cosicché le variazioni angolari del braccio rispetto al pendolo sono proporzionali alle ondulazioni del profilo per frequenze comprese fra 0.5 e 20 Hz.

Un trasduttore digitale delle distanze misura la lunghezza di strada percorsa e la velocità.

L'analisi dei risultati può essere filtrata in lunghezze d'onda corte (1-3.3m), medie (3.3-13m) e lunghe (13-40m); la conoscenza dell'ampiezza delle irregolarità per le suddette onde è molto importante per individuare la causa delle irregolarità. Infatti se l'irregolarità è dovuta alle onde corte è presumibile che la causa sia da ricercare negli strati superficiali della pavimentazione, mentre per onde lunghe la irregolarità può essere dovuta a problemi di assestamento anomali degli strati di fondazione o sottofondo della strada.



**Figura 2. 7** Foto e schematizzazione dell'APL

L'ARAN (Automatic Road Analyzer ) è un altro apparecchio che consente di valutare le irregolarità del profilo longitudinale (Figura 2. 8); inizialmente quest'ultime venivano misurate in maniera indiretta, nel senso che anziché misurare le irregolarità geometriche del profilo, misurava le accelerazioni verticali cui era soggetto l'asse posteriore dello strumento quando esso percorreva la pavimentazione, a mezzo di un accelerometro. Di recente invece l'ARAN è stato dotato di un secondo accelerometro montato su telaio; in tal modo è possibile risalire agli spostamenti verticali impressi dalle irregolarità del piano viabile e quindi

direttamente alle irregolarità del profilo longitudinale. La modalità di misura è di tipo continua con velocità di 60 km/h, mentre la frequenza di campionamento è di 20 m, per lo studio dell'aderenza, e 10 cm per il profilo longitudinale.

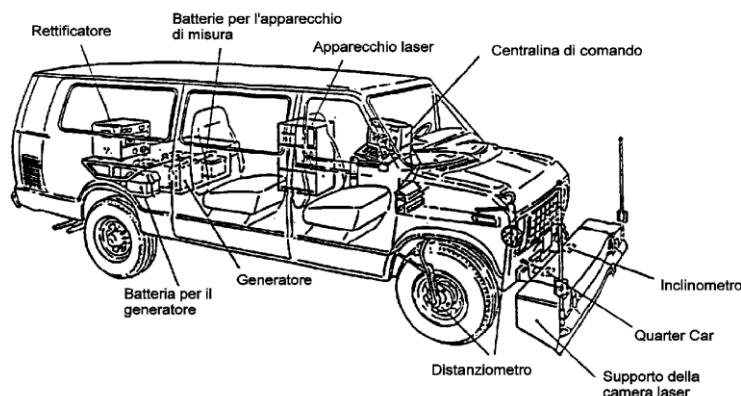


Figura 2. 8 Schematizzazione dell'ARAN.

### 2.2.1 CLASSIFICAZIONE DEI METODI DI MISURA DELL'IRREGOLARITÀ SECONDO LA WORLD BANK

L'irregolarità della strada ha assunto un'importanza sempre maggiore negli anni sia in termini di indicatore delle condizioni stradali che in termini di costi sostenuti dall'utente della strada. La necessità di valutare tali irregolarità ha portato alla comparsa sul mercato di una vasta gamma dispositivi, dai più semplici ai più sofisticati, in parte illustrati precedentemente.

Allo stesso tempo si presenta la difficoltà di correlazione e di trasferibilità delle misure ottenute dai vari strumenti, e della calibratura ad una scala comune di riferimento, situazione esasperata dai tantissimi fattori che causano variazioni tra le varie letture ottenute con strumenti simili e persino con lo stesso strumento.

Per tali necessità, nel 1982 un ampio gruppo di ricerca ha partecipato all'International Road Roughness Experiment ( IRRE ), in Brasile, documentato dalla Worl Bank nel Technical Paper number 45 ( WTP-45 ), allo scopo di identificare un indice di irregolarità. Investigando un ampio numero di strade con un altrettanto ampio numero di strumenti e metodi si è pervenuti ad un indice universale delle irregolarità, noto come IRI ( International

Roughness Index ), che meglio soddisfa i criteri di stabilità nel tempo e trasportabilità (Sayers,1995).

In virtù di quanto detto, i molteplici approcci di misura delle irregolarità stradali, e l'ampia gamma di strumentazioni in uso in tutto il mondo possono essere raggruppati in quattro classi generiche sulla base di come le loro misure influiscono sul valore IRI, il quale a sua volta è influenzato dai requisiti di calibratura e di accuratezza associati con il loro utilizzo (Sayers, Gillespie e Paterson ,1986).

Tale classificazione è riportata nel WTP-46 come segue:

- **Classe 1— Profili di precisione :** questa classe rappresenta lo standard di accuratezza più alto per il calcolo dell'IRI; un metodo di Classe 1 richiede che le elevazioni vengano misurate ad intervalli di campionamento al di sotto di 250 mm ( 4 misure al m) con una precisione di 0.5 mm per pavimentazioni molto regolari. Esempi di profili di tale classe sono quelli ottenuti da indagini condotte con strumenti manuali, quali stadie e livelli, Dipstick.
- **Classe 2— Altri metodi profilometrici:** un profilo di Classe 2 è misurato con uno strumento che non soddisfa i requisiti di Classe 1 in termini di precisione e intervallo di campionamento. Infatti gli intervalli per questa classe sono al massimo pari a 500 mm con una precisione su strade regolari al di sotto di 1 mm. Quindi l'IRI computato da misure di Classe 2 non può essere accurato tale da dettare limiti pratici. Esempi di profili di tale classe sono quelli ottenuti con l'utilizzo di strumenti profilometrici, quali l'APL, i profilometri tipo GMR, profilometri laser.
- **Classe 3— IRI stimati da equazioni di correlazione:** questa classe include strumenti che misurano lo spostamento relativo tra telaio e sospensione , cioè i cosiddetti strumenti di tipo a risposta, quali il Bump Integrator, l'ARAN. Questo perché le misure di tali dispositivi sono altamente influenzati dalla dinamica dei veicoli che le determinano.

- **Classe 4— Misure soggettive:** questa classe include tutte le indagini delle irregolarità di tipo soggettivo, che a volte possono essere assistite attraverso l'uso di strumentazioni non calibrate.

## **2.3 RESTITUZIONE DEI PROFILI DI REGOLARITÀ**

Una volta noto il profilo stradale, di una data lunghezza e passo di campionamento, è possibile determinare, attraverso l'analisi armonica generalizzata, la rappresentazione della tessitura nel dominio delle frequenze spaziali, vale a dire una scomposizione in onde sinusoidali. Per la modellazione delle irregolarità delle superfici stradali e aeroportuali, con l'obiettivo di valutare in maniera globale la distribuzione statistica delle ampiezze in funzione delle varie lunghezze d'onda, normalmente si ricorre a processi stocastici stazionari di tipo Gaussiano a media nulla, e quindi alla determinazione, a partire da uno o più profili di pavimentazioni, della determinazione della funzione densità spettrale di potenza PSD.

Sapendo che la maggior parte delle classificazioni adottate per la regolarità e per la tessitura, partono dalla suddivisione in intervalli di frequenza spaziale della forma d'onda  $z(x)$ , ovvero il profilo restituito dal dispositivo di misura, che approssima abbastanza bene il profilo reale. Per lo stesso motivo, quando occorre spiegare ed interpretare un qualsiasi fenomeno di interazione tra veicolo e pavimentazione, visto che esiste una diretta dipendenza tra intervalli di lunghezza d'onda e fenomeno di interazione, è necessaria la conoscenza della distribuzione delle ampiezze all'interno degli intervalli di lunghezza d'onda.

Altra procedura di verifica dello stato di degrado delle pavimentazioni, adottata maggiormente in campo stradale, prevede l'introduzione di indici sintetici, determinabili sempre a partire dalla misura dei profili di pavimentazione ed atti ad esprimere una valutazione globale. Volendo perciò selezionare uno o più indicatori caratteristici, in base ai quali stabilire una metodologia di individuazione delle priorità per gli interventi, il manutentore stradale/aeroportoale ha a disposizione numerose opzioni. In letteratura sono



stati proposti diversi indici per descrivere il livello medio di regolarità, quali l'IRI (International Roughness Index), il Root Mean Square of Vertical Acceleration (RMSVA), il Riding Comfort Index (RCI) (Transport Canada, 2005), il Profile Index (PI), il Ride Number (RN), l'Energia Normalizzata (NE) (Sayers et al., 1998; Woods & Papagiannakis 2009).

La Boeing Company Airport Technology Group ha, infatti, elaborato una procedura semplificata, nota come Boeing Bump Method (De Bord, 1995) fornendo un diagramma lunghezze d'onda ( $\lambda$ ) / ampiezze irregolarità (A), adottato dalle vigenti normative internazionali (ICAO, FAA); entrando in tale diagramma con una coppia di valori  $\lambda/A$  si determina in quale delle tre zone di irregolarità (accettabile, eccessiva, inaccettabile) si ricade.

Il metodo suddetto non fornisce però alcuna indicazione in merito alla risposta dinamica effettiva dell'aeromobile verso le irregolarità in termini di accelerazione verticali e di sollecitazioni strutturali al velivolo e alla sovrastruttura.

Recentemente alcuni ricercatori (Liu W. et al 2005; Doung Brown et al. 2010) hanno proposto di adottare l'Analisi Wavelet per caratterizzare i profili di regolarità, tecnica innovativa di elaborazione dei segnali.

Essa può intuitivamente essere pensata come un "microscopio matematico", in grado di mettere a fuoco passaggi molto rapidi e singolarità del segnale analizzato; la funzione wavelet utilizzata determina l'ottica di tale microscopio mentre il livello d'ingrandimento viene determinato dal parametro di scala scelto. Diversamente dalle funzioni sinusoidali che sono le basi di Fourier, le basi wavelet sono interessanti poiché agiscono come filtri passabanda in entrambi i domini (spazio e frequenza). Una trasformata wavelet riesce a catturare sia gli eventi di alte frequenze- breve durata e sia gli eventi di basse frequenze - ampia durata, entrambe caratteristiche dei segnali non stazionari, quali sono i profili. Per la completa descrizione di tale tecnica si rimanda al capitolo IV.

### 2.3.1 Rappresentazione del profilo nel dominio delle frequenze: PSD (Power Spectral Density)

Considerare il profilo stradale alla stregua di un segnale di tipo digitale acquisito elettronicamente, permette almeno teoricamente di ricondurre lo stesso ad un processo aleatorio stazionario ed ergodico. È quindi possibile rappresentarlo nel dominio della frequenza spaziale, passando attraverso la funzione PSD; in tal modo, infatti, è plausibile quantificare il contenuto in termini di densità spettrale di potenza delle ampiezze della forma d'onda "tessitura" relativamente ad un intervallo di frequenza spaziale.

Per un qualsiasi profilo di pavimentazione di lunghezza  $L$  e passo di campionamento  $\Delta L$ , l'intervallo di definizione della funzione discreta PSD, espressa in armoniche con una scansione pari a  $\Delta n$ , va da 0 a  $n_{\max}$ , dove quest'ultima rappresenta la frequenza teorica spaziale massima:

$$n_{\max} = \frac{1}{\Delta L}$$

$$\Delta n = \frac{1}{L}$$

I valori di  $\Delta n$  e  $n_{\max}$  dipendono solamente dalla lunghezza e dal passo adottato per la misura del profilo. La frequenza efficace spaziale di campionamento, nel rispetto del teorema di Nyquist, è pari a:

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_{\max}}{2}$$

indicando con  $n_{\text{eff}}$  proprio la frequenza limite utilizzabile per evitare il fenomeno di aliasing, consentendo così di riprodurre il segnale senza distorsioni. È, infatti, noto che, fornito il segnale originale campionato in modo da rispettare il teorema suddetto, lo stesso segnale può essere riprodotto matematicamente attraverso la somma di una serie d'armoniche: in particolare se il profilo è definito da  $N$  punti in elevazioni equamente spaziate, esso può essere duplicato tramite la somma di  $N/2$  sinusoidi.

Per un profilo vero, vale a dire per una raffigurazione continua della superficie stradale, in corrispondenza di un definito valore di frequenza spaziale  $n$ , centrata entro una certa banda  $\Delta n$ , il valore della funzione densità spettrale di potenza è definita dall'espressione

$$G_d(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(n, \Delta n)}{\Delta n}$$

dove  $\Psi_x^2$  è il valore quadratico medio della componente del segnale alla frequenza spaziale  $n$ , entro la frequenza di banda  $\Delta n$ . Dato che in realtà il profilo rilevato è opportunamente discretizzato, la relazione suddetta deve essere riscritta in forma discreta come segue:

$$G_d(n_i) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n}$$

dove  $i$  varia tra 0 e  $n_{max}/\Delta n = N$ .

Assumendo l'espressione della seguente armonica per descrivere un profilo stradale

$$y(x) = A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi) = A_i \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi)$$

si può dimostrare che il valore quadratico medio del segnale  $y(x)$  è pari a:

$$\Psi_x^2 = \frac{A_i^2}{2}$$

Da questa espressione si può facilmente affermare che la relazione tra il contenuto spettrale, ottenuto con la trasformata di Fourier, e la PSD del profilo stradale discretizzato può essere definito attraverso la seguente espressione:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2 \cdot \Delta n}$$

È comunque doveroso fare una precisazione a riguardo: poiché si considera il profilo stradale alla pari di un processo aleatorio, costituito da una collezione (anche infinita) di realizzazioni (dette anche funzioni campione), andrebbe estratta una popolazione statistica significativa di esse sulle quali valutare la PSD degli spostamenti verticali, farne la media dei valori ottenuti e su questa valutare la trasformata di Fourier. Ecco perché a rigore i valori di PSD degli spostamenti verticali del profilo stradale per un'assegnata frequenza spaziale  $n_i$  non sono direttamente collegati all'ampiezza  $A_i$  associata alla medesima frequenza attraverso l'equazione suddetta.

Indicazioni utili circa l'impiego della PSD per la descrizione del profilo stradale sono riportate nella Norma ISO 8608 "Mechanical Vibration – Road surface profiles Reporting of measured data".

La Norma, infatti, raccomanda di descrivere il profilo stradale mediante la densità spettrale di potenza delle quote verticali: questa è possibile rappresentarla in un piano bi-logaritmico, adottando due diverse scale di rappresentazione, una in termini di frequenza spaziale  $n$ ,  $G_d(n)$ , e l'altra in termini di frequenza spaziale angolare  $\Omega$ ,  $G_d(\Omega)$ , con  $\Omega = 2\pi \cdot n$ ; generalmente si preferisce la prima forma di rappresentazione. La medesima Norma inoltre propone un secondo metodo di descrizione, attraverso la PSD delle accelerazioni,  $G_a(\cdot)$ , intesa come variazione di pendenza della superficie per unità di lunghezza percorsa e rappresentata anch'essa in un piano bi-logaritmico.

Il legame che sussiste tra i due metodi di rappresentazione, rispettivamente in termini di  $n$  e  $\Omega$ , è descritto dalle relazioni:

$$G_a(n) = (2\pi \cdot n)^4 \cdot G_d(n)$$

$$G_a(\Omega) = \Omega^4 \cdot G_d(\Omega)$$

La ISO 8608 inoltre individua otto classi di regolarità indicate con le lettere da A ad H: per ciascuna di esse viene riportata la curva di PSD che fornisce i valori assunti dalla densità spettrale di potenza in corrispondenza di una frequenza spaziale convenzionale  $n_0 = 0.1$  cicli/m oppure di una frequenza angolare convenzionale  $\Omega_0 = 1$  rad/m. Alla classe A appartengono pavimentazioni stradali con il maggior grado di regolarità, mentre alla classe H quelle con il grado peggiore. Le curve suddette possono essere utilizzate per le simulazioni in mancanza dei dati del profilo reale, e sono definite dalle seguenti espressioni:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-2}$$

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \cdot \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-2}$$

dove , per ciascuna classe, i valori limite di  $G_d(n_0)$  e  $G_d(\Omega_0)$  sono riportati in tabella 3.1, mentre i valori assunti da  $G_d(n)$  e  $G_d(\Omega)$  sono graficizzati in figura 3.3.5.

Classe	$G_d(n_0=0.1\text{cicli/m})$	$G_d(\Omega_0=1\text{rad/m})$
A	0-32	0-2
B	32-128	2-8
C	128-512	8 -32
D	512-2048	32-128
E	2048-8192	128-512
F	8192-32768	512-2048
G	32768-131072	2048-8192
H	131072 - $\infty$	8192- $\infty$

**Tabella 3.1**-Valori limite di  $G_d(n_0)$  e  $G_d(\Omega_0)$  ( $\times 10^{-6} \text{m}^3$ ) [4]

Alcuni ricercatori (Liu W.et al 2005; Doung Brown et al. 2010) hanno recentemente proposto di adottare l'Analisi Wavelet per caratterizzare i profili di regolarità, tecnica innovativa di elaborazione dei segnali. Essa può intuitivamente essere pensata come un “microscopio matematico”, in grado di mettere a fuoco passaggi molto rapidi e singolarità del segnale analizzato; la funzione wavelet utilizzata determina l'ottica di tale microscopio mentre il livello d'ingrandimento viene determinato dal parametro di scala scelto. Diversamente dalle funzioni sinusoidali che sono le basi di Fourier, le basi wavelet sono interessanti poiché agiscono come filtri passabanda in entrambi i domini (spazio e frequenza). Una trasformata wavelet riesce a catturare sia gli eventi di alte frequenze- breve durata e sia gli eventi di basse frequenze - ampia durata, entrambe caratteristiche dei segnali non stazionari, quali sono i profili. Per la completa descrizione di tale tecnica si rimanda al capitolo IV

## III CAPITOLO

### MODELLI DI DEGRADO

#### 3.1 GENERALITÀ

Il degrado funzionale e strutturale delle pavimentazioni è, di fatto, un fenomeno graduale e continuo, sebbene per semplicità di calcolo la maggior parte dei metodi analitici impiegati per il progetto delle sovrastrutture utilizzino approcci di tipo discreto.

Nelle analisi che sono eseguite nell'ambito della manutenzione programmata delle pavimentazioni, la necessità di poter, in ogni istante, valutare l'effettivo stato di ammaloramento di una sovrastruttura e quindi la sua vita utile residua rende indispensabile l'impiego di modelli di comportamento continui. Il degrado viene pertanto generalmente tenuto in conto modellando le prestazioni complessive della sovrastruttura come una funzione decrescente e convessa del tempo, dato che il danno accumulato si manifesta con maggiore intensità verso la fine del periodo di esercizio dell'infrastruttura.

La definizione dei modelli di deterioramento delle pavimentazioni quindi assumono un ruolo fondamentale nell'ambito di un sistema di gestione PMS. Essi consentono alle autorità competenti di prevedere il degrado della pavimentazione e di determinare le esigenze e le attività d'intervento, presumendo i tempi di manutenzione o di riabilitazione della sovrastruttura, e di fare una stima dei finanziamenti a lungo termine necessari per conservare le prestazioni della rete gestita.

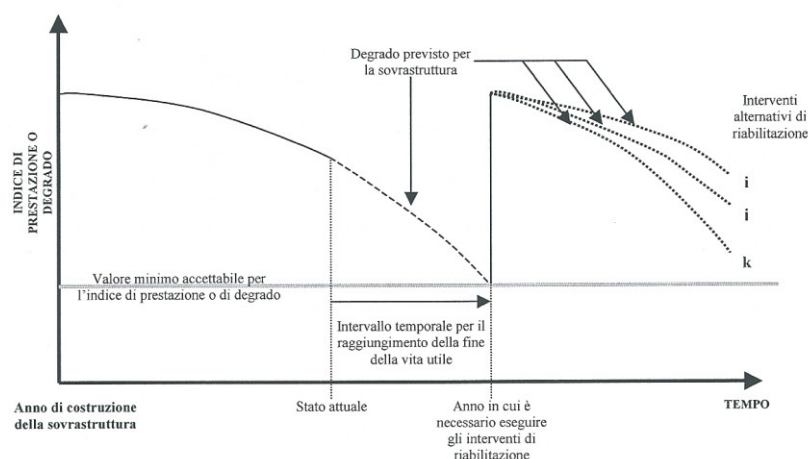
Si definisce *previsione del degrado* la descrizione matematica dei valori attesi che un dato attributo potrà assumere durante uno specifico periodo di analisi (Hudson et al,1979), dove per attributo si intende una proprietà di un tratto o di una classe di pavimentazioni che fornisce una misura significativa del comportamento, della prestazione, dell'adeguatezza, del costo o del valore della stessa pavimentazione (Figura 3. 1). In altre parole, essa rappresenta una descrizione matematica impiegata per prevedere lo stato futuro di una pavimentazione

come una funzione delle variabili esplicative o fattori che tengono conto della struttura della pavimentazione, dell'età, dei carichi del traffico, e delle variabili ambientali.

Infatti le sole banche dati sono di scarsa utilità al processo di gestione se non sono affiancate da strumenti attraverso i quali prevedere l'evoluzione futura dello stato delle sovrastrutture (descritto quest'ultimo mediante indici sintetici o specifici), detti appunto *modelli di prestazione o di degrado*. La motivazione principale per cui i gestori sono spinti a impegnare una parte considerevole delle loro risorse nel monitoraggio dei dati sullo stato, funzionale e strutturale, delle pavimentazioni, è quella di riuscire a individuare l'evoluzione storica delle prestazioni, al fine di impiegare tali informazioni nelle operazioni di pianificazione degli interventi di manutenzione e riabilitazione.

I modelli di prestazione o di degrado sono impiegati nei sistemi di gestione della manutenzione con differenti finalità a seconda se si considera il livello di rete o quello di progetto. Nella gestione a livello di rete i modelli di degrado costituiscono una componente essenziale per le analisi pluriennali condotte al fine di stimare gli effetti del tipo di intervento di manutenzione e riabilitazione e la loro programmazione temporale, o di prevedere l'evoluzione dello stato delle sovrastrutture con particolare riferimento all'eventuale raggiungimento delle soglie di attenzione; inoltre permettono la valutazione degli impatti a lungo termine dei diversi scenari di intervento e la stima dei costi delle sovrastrutture per l'intero ciclo di vita utile. Essi inoltre, essendo nella maggioranza dei casi basati su misure effettuate in sezioni rappresentative dell'intera rete, forniscono un'indicazione sull'evoluzione media dell'insieme delle sezioni facenti parte delle sovrastrutture della rete in esame.

I modelli di degrado o di prestazione utilizzati a livello di progetto, analizzano più nel dettaglio i singoli interventi: essi vengono utilizzati sia nella progettazione di specifici interventi di manutenzione e riabilitazione su singole tratte, che nelle analisi comparative tra più interventi in funzione dei costi raggiungibili nel ciclo di vita della sovrastruttura.



**Figura 3. 1-**Illustrazione schematica dell'impiego dei modelli di degrado nell'ambito di un PMS.

Secondo una prima classificazione dei modelli di degrado, questi possono essere distinti in:

- ☞ modelli deterministici;
- ☞ modelli non deterministici.

I primi forniscono un unico valore per l'indice di prestazione (i.e. indice sintetico), e quindi per la vita utile della sovrastruttura; possono riguardare il degrado strutturale o il degrado funzionale. Sono molto diffusi per la relativa facilità di interpretazione e di sviluppo attraverso gli usuali strumenti statistici. I modelli che appartengono alla seconda tipologia a loro volta si suddividono in: probabilistici e fuzzy. Essi hanno in comune il fatto che la valutazione previsionale delle prestazioni non avviene in termini assoluti, ma al valore dell'indice di stato viene associata la probabilità che questo si verifichi, nei modelli probabilistici, e un grado di verità, nel caso delle logiche fuzzy. Esiste un'ulteriore classificazione dei modelli di degrado, in funzione della metodologia operativa di sviluppo degli stessi, in base alla quale è possibile distinguerli in:

- Modelli *empirici*, sviluppati dall'analisi statistica dei dati sull'evoluzione del degrado, strutturale o funzionale delle sovrastrutture, misurati sia in sito su pavimentazioni in esercizio che in laboratorio su sovrastrutture in scala reale;
- Modelli *empirico-meccanicistici*, sviluppati a partire sia dai risultati delle analisi sul comportamento meccanico delle sovrastrutture che dalle misure sperimentali effettuate in sito ed in laboratorio;



- Modelli *meccanicistici*, sviluppati attraverso l'analisi teorica del comportamento delle sovrastrutture.

I modelli di degrado, esistenti in letteratura, sono stati sviluppati quasi sempre seguendo un approccio di tipo empirico, utilizzando quindi dati misurati (attraverso campagne di ricerca) e correlando, attraverso regressioni statistiche, la variabile dipendente (osservata o misurata) a diverse variabili indipendenti, quali ad esempio il numero di passaggi di assi standard, la rigidità della pavimentazione, le caratteristiche ambientali, e loro interazioni.

Il modello di degrado della pavimentazione, in generale, è la parte tecnologicamente più difficile della gestione delle pavimentazioni (Johnson e Cation, 1992) a causa delle incertezze del comportamento della pavimentazione stessa sottoposta al carico del traffico variabile, agli effetti dell'ambiente, unitamente alla difficoltà di quantificare i fattori che influenzano il degrado della stessa.

Tuttavia affinché si possa ricavare un modello di previsione affidabile, è necessario che sussistano i seguenti requisiti fondamentali (Darter, 1980):

- L'impiego di una base dati adeguata;
- L'individuazione di tutte le variabili che hanno influenza significativa sulle prestazioni;
- La scelta di una forma funzionale adeguata, per la legge di degrado;
- La verifica della precisione del modello eseguita attraverso opportuni indicatori (p.e. indicatori sintetici nel caso di modelli di regressione).
- 

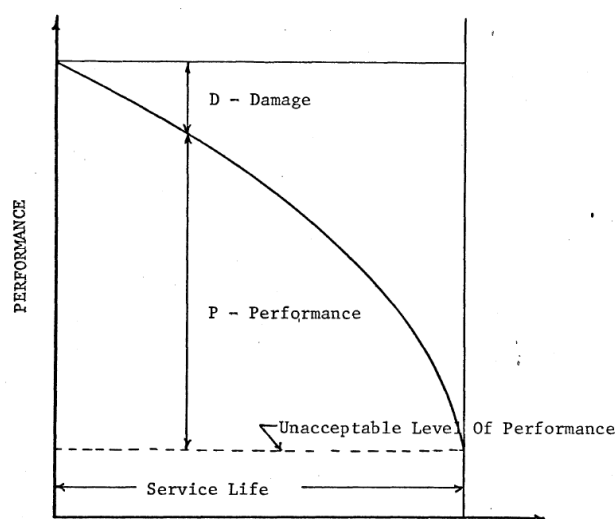
### **3.2 RUOLO DELLE VARIABILI NEI MODELLI DI DEGRADO**

La valutazione dell'evoluzione del livello di regolarità di una pista aeroportuale rappresenta un aspetto di primaria importanza nell'ambito di un moderno sistema di gestione

delle pavimentazioni aeroportuali (APMS). Se facilmente intuibile risulta l'importanza del coefficiente di aderenza nei confronti della sicurezza, specie su una pavimentazione bagnata, in presenza di acqua, ghiaccio o di accumulo di detriti quali la gomma degli pneumatici lasciata dagli aerei, di non minore importanza è quello della regolarità della pavimentazione, che influenza anche l'aderenza (basti pensare, per esempio, al ristagno delle acque nelle zone irregolari). Inoltre così come è stato evidenziato nel capitolo 2, la regolarità incide non solo sui fenomeni di maggiore fatica della pavimentazione (per le sollecitazioni dinamiche indotte), ma risulta responsabile anche dei fenomeni di fatica sugli aeromobili, con un aggravio dei costi d'uso degli stessi (SITEB, 2000).

Tuttavia il processo di deterioramento della regolarità resta ancora alquanto complesso da poter essere pienamente compreso e descritto.

Il concetto su cui si basa un modello di degrado delle prestazioni di una pavimentazione, è che esiste uno stretto legame tra la performance della sovrastruttura e il danno che la stessa subisce. Idealmente la prestazione P di una pavimentazione potrebbe essere rappresentata come in Figura 3. 2:



**Figura 3. 2** - Concetto di Performance (P) e Danno (D) (Barnes B.D.,1971).

Esprimendo P e D in quantità frazionali, variabili nel range 0 - 1, una relazione tra le due grandezze può essere definita come funzione del tempo o del traffico, t, nel seguente modo:

$$P(t) = 1 - D(t)$$

In tal modo, per  $t=0$ , si ha  $P(t)=1$  e  $D(t)=0$ , ed è una condizione che idealmente si verifica all'inizio dell'esercizio della pavimentazione; la situazione opposta invece si ha quando  $t$  coincide con la fine vita utile della pavimentazione, per cui si verifica che  $P(t)=0$  e  $D(t)=1$ .

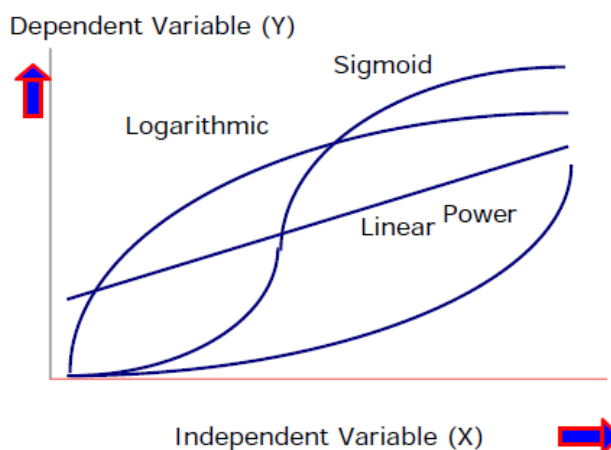
Quindi per avere una valutazione completa dello stato di degrado di una pavimentazione, è necessario individuare almeno due funzioni di trasferimento,  $T$  e  $U$ ; la prima,  $T(Y_i)$ , che legghi una serie di caratteristiche  $Y_i$  (proprietà dei materiali, geometria, condizioni climatiche, traffico) alla risposta futura della pavimentazione (danno o degrado) che la stessa esibirà sotto certe condizioni ambientali e di traffico. La seconda funzione,  $U(X_i)$ , che invece valuti le misure del danno o degrado, le  $X_i$  (dissesti, irregolarità) e ne preveda la reazione degli utenti.

Per definire i modelli previsionali è importante identificare quindi i parametri essenziali e rilevanti da monitorare; la mancanza di dati adeguati non permette una valutazione accurata dello stato della pavimentazione e quindi il rischio è che le decisioni eventualmente intraprese tendono a diventare di breve efficacia.

Sebbene la scelta delle variabili rilevanti sia un importante passaggio nella costruzione di un modello empirico, altrettanto importante è la selezione di una forma di regressione appropriata. Il modello di regressione è tra i metodi più diffusi per stabilire una relazione empirica tra due o più variabili; in essi generalmente la caratteristica superficiale di cui si vuole conoscere l'evoluzione nel tempo (e.g. la regolarità), rappresenta la variabile dipendente ed è messa in relazione ad uno o più fattori selezionati come variabili indipendenti (e.g. il traffico). Tra le forme di regressione maggiormente adottate, si distingue quella di tipo: lineare, potenza, sigmoidale, logaritmica e polinomiale (Figura 3. 3).

Nella maggior parte delle analisi di regressione l'adattamento del modello è descritta dal valore del coefficiente di determinazione ( $R^2$ ) (Peter et al. 1995). Il valore di  $R^2$  è basato su coefficienti di correlazione del campione che indicano la forza della relazione sviluppata tra la variabile di risposta e le variabili indipendenti rispetto ai dati osservati.  $R^2$  può quindi essere interpretato come la parte dell'incertezza totale della variabile dipendente che può essere spiegata con le variabili indipendenti. Il  $R^2$  può variare da 0 a 1, dove il valore massimo indica

un migliore adattamento del modello ai dati reali; tuttavia,  $R^2$  non è sempre l'indicazione giusta soprattutto quando è eseguita una regressione non lineare.



**Figura 3.3** Esempi di curve di regressione tipiche.

Sembra esserci un generale accordo nel ritenere che tra i numerosi fattori che influenzano l'evoluzione dell'aderenza e della regolarità (traffico, proprietà delle miscele, condizioni climatiche e meteorologiche), il traffico rappresenti il fattore cui sono attribuite le maggiori responsabilità in termini di decadimento delle caratteristiche superficiali.

Un'attenta analisi bibliografica, ha evidenziato una forte carenza di studi e di campagne sperimentali finalizzate allo sviluppo di un modello di degrado della regolarità in ambito aeroportuale e ciò ha incoraggiato maggiormente gli autori ad intraprendere la presente attività di ricerca. Si è allo stesso tempo osservato un quadro scientifico più denso di lavori in cui sono stati proposti modelli di degrado dell'aderenza di tipo empirico e la maggior di essi si basano sui seguenti presupposti:

- ✓ Il traffico, assunto come variabile indipendente, è ritenuto il fattore principale che governa il processo di deterioramento delle caratteristiche superficiali della pavimentazione;
- ✓ È opportuno tener conto che a ciascuna tipologia di aeromobili corrispondono determinate caratteristiche strutturali (configurazione e numero di gomme per

ciascun carrello, velocità, peso) e una certa frequenza (numero di movimenti/annuo);

- ✓ Conseguentemente all'osservazione del punto precedente, si può assumere che le diverse tipologie di aeromobili causano un differente deterioramento della superficie all'interfaccia pneumatico-pavimentazione. Un tale concetto viene sempre applicato in sede progettuale della pavimentazione ma spesso non considerato così importante nella modellazione del degrado della stessa.
- ✓ I differenti volumi e spettri di traffico aereo devono quindi essere espressi in termini di uno stesso parametro (numero di ricoprimenti equivalenti) mediante un opportuno criterio di omogeneizzazione o di equivalenza del danno.

Tra i lavori più recenti, si cita quello svolto da Festa et al.(2008), che per comodità di scrittura da qui in poi sarà indicato nella forma *modello ECs*, secondo cui il modello di deterioramento dell'aderenza è considerato funzione del numero di ricoprimenti equivalenti, e non semplicemente come funzione del numero di movimenti degli aeromobili sulla pista (decolli e atterraggi).

Nella presente memoria, il modello ECs, è stato preso a riferimento al fine di sviluppare un modello volto a definire l'evoluzione della regolarità nelle pavimentazioni delle piste di volo. In particolare, rielaborando il criterio di omogeneizzazione del danno proposto nel modello preso a riferimento, si è proposto un approccio semplificato per il calcolo dei ricoprimenti equivalenti.

### **3.3 PROPOSTA DI SVILUPPO DI UN MODELLO DI DEGRADO DI REGOLARITÀ**

Al fine di implementare correttamente il modello previsionale, è importante, da un lato, selezionare i migliori parametri descrittivi della regolarità, mentre dall'altro lato, caratterizzare il traffico in termini di spettro ( i.e. la frequenza associata a ciascuna tipologia

di aeromobile), di distribuzione laterale delle traiettorie dei velivoli e di ricoprimenti equivalenti.

Il framework per lo sviluppo del nuovo modello, che lega il degrado della regolarità della pista di volo al danno prodotto dal traffico aereo, può essere sintetizzato nei tre seguenti punti:

- ① Caratterizzazione del traffico in termini di ricoprimenti equivalenti,  $N_{eq}$ ;
- ② Caratterizzazione della regolarità (e.g. indici sintetici);
- ③ Definizione del modello di degrado (e.g. forma regressiva idonea).

Per ciò che concerne il punto ① si può fare riferimento ai prossimi paragrafi del presente capitolo, mentre per i punti ② e ③ si rimanda al capitolo successivo.

### 3.3.2 CARATTERIZZAZIONE DEL TRAFFICO IN TERMINI DI RICOPRIMENTI EQUIVALENTI ( $N_{Ceq}$ )

Al fine di caratterizzare attentamente il fenomeno del deterioramento, il modello proposto dovrà essere funzione del numero di ricoprimenti equivalenti,  $N_{Ceq}$  (Festa et al., 2008). Questi sono ottenuti come prodotto del numero di ricoprimenti,  $NC$ , per un fattore di equivalenza,  $DR$ .

In accordo ai criteri di progetto delle piste e delle vie di rullaggio di un aeroporto, adottati dalla FAA (HoSang, 1975), si definisce *ricoprimento* il numero di volte che un punto della pista, distante  $\delta$  metri dall'asse pista, è interessato dal passaggio delle gomme del  $j$ -esimo carrello (i.e. posteriori e anteriore) del  $i$ -esimo aeromobile, nelle operazioni di decollo e atterraggio. Il fattore di equivalenza  $DR$  tiene conto del differente danno prodotto dai diversi tipi di aeromobili e carrelli (principale o posteriore e anteriore).

#### 3.3.1.1 Calcolo dei ricoprimenti

I ricoprimenti derivanti dalle operazioni di una particolare tipologia di aeromobile sono funzione di diversi parametri, quali:

- Numero di passaggi degli aeromobili;

- Numero e spaziatura delle gomme sul carrello principale;
- Dalla pressione di gonfiaggio
- Larghezza dell'area d'impronta;
- Distribuzione laterale delle traiettorie dei carrelli (wheel-path) relative all'asse centrale della pista di volo.

Per calcolare il numero di ricoprimenti è perciò necessario conoscere prima gli spettri e i volumi di traffico operanti nell'aeroporto di interesse, e poi per ciascuno degli aeromobili, definire le caratteristiche sopra elencate.

Le osservazioni dal vero dei movimenti degli aeromobili hanno dimostrato che i passaggi dei carrelli hanno una distribuzione statistica di tipo normale rispetto all'asse della pista (HoSang V., 1975; Wang S. Y. et al., 2008). Il grado della dispersione può essere caratterizzato dal valore della deviazione standard, i cui valori, insieme a quelli dell'offset medio dall'asse centrale della pista, sono riportati nella Tabella 3. 1 per le diverse operazioni (atterraggio e decollo).

Adottando quindi una distribuzione laterale delle traiettorie di tipo normale, così come suggerisce la stessa FAA; per ricavare il numero di ricoprimenti che si riferisce all' $i$ -esimo aeromobile del  $j$ -carrello,  $NC_{ij}$ , può essere ricavato dalla seguente relazione [1]:

$$[1] \quad NC_{i,j}(\delta) = \left( \sum_{k=1}^n V_{i,k} \right)_i \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_i(y) \cdot R_{i,j}(y, \delta) dy$$

Dove

$R_{ij}(y, \delta)$  è il numero di gomme appartenenti al  $j$ -esimo carrello dell' $i$ -esimo tipo di aeromobile che ricopre un punto della pista distante " $\delta$ " dall'asse della pista, mentre l'asse longitudinale dell'aeromobile si muove ad una distanza  $y$  dall'asse centrale (durante un'operazione di decollo o atterraggio);

$f_{i-landing}(y)$  è la funzione densità di probabilità della distribuzione laterale delle traiettorie di atterraggio (o decollo) dell' $i$ -esimo aeromobile;

$V_{i,k}$  è il numero di partenze (decolli) o arrivi (atterraggi)  $i$ -esimo aeromobile durante il  $k$ -esimo anno;

n è il numero di anni a cui sono riferiti i ricoprimenti.

**Tabella 3. 1** Offset medio e deviazione standard della distribuzione laterale delle traiettorie sulla pista aeroportuale (HoSang V.,1975)

Tipologia operazione	Larghezza runway [m]	Range di variabilità: offset dall'asse pista[m]	Range di variabilità: deviazione standard [m]
<b>Runways</b>			
Atterraggio (Landing)	46	0.27 sx ÷ 0.46 sx	2.13 ÷ 3.14
	70	0.24 dx ÷ 0.70 sx	2.74 ÷ 3.41
Decollo (Take-off)	46	0.15 sx ÷ 0.37 sx	1.83 ÷ 2.52
	70	0.70 sx ÷ 0.76 sx	2.29 ÷ 2.50
LEGENDA: dx = a destra dell'asse pista ; sx= a sinistra dell'asse pista			

### 3.3.1.2 Criterio di equivalenza o omogeneizzazione del danno

I carichi indotti dal traffico, in generale, vengono trasmessi alla pavimentazione attraverso l'area di contatto. Nel caso specifico degli aeromobili, il carico viene trasmesso dalla gamba di forza del carrello alle ruote, che a loro volta lo trasmettono alla pavimentazione, distribuendolo su una superficie di contatto, detta area di impronta.

L'impronta del pneumatico può essere definita come l'area racchiusa dalla superficie di contatto tra il pneumatico e la pavimentazione e può essere definita dalla seguente relazione:

$$[2] \quad A = \frac{Q}{p}$$

dove  $Q$  è il carico gravante sulla ruota e  $p$  rappresenta la pressione di gonfiaggio; ne consegue che  $A$  è funzione del carico e della pressione di gonfiaggio.

Riguardo alla pressione di gonfiaggio, per gli aerei commerciali essa varia nell'intervallo 0.9-1.4 MPa, mentre per gli aerei militari mediamente è compresa nell'intervallo 1.4-2.0 MPa.

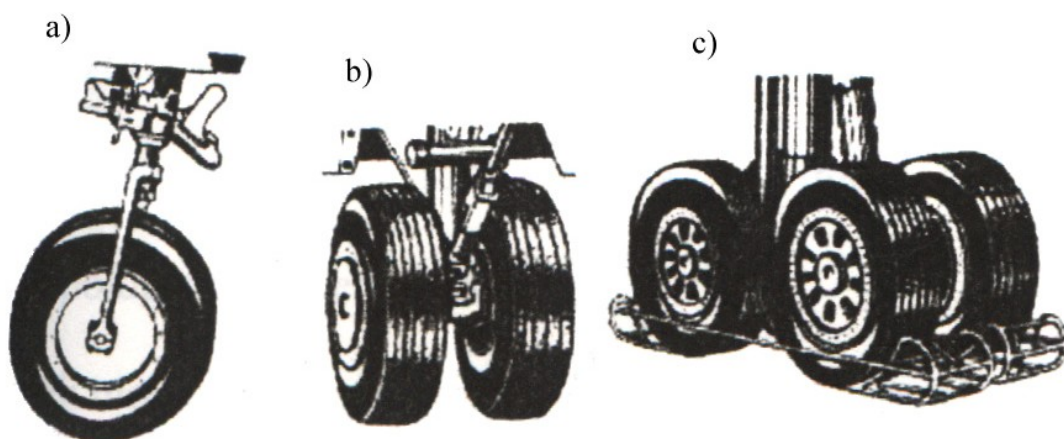
La ripartizione del carico sulle gambe di forza di un velivolo è, ovviamente, funzione della tipologia di carico, variabile, a sua volta, in relazione alle tre fasi operative fondamentali dell'aeromobile. Si possono distinguere i seguenti carichi:



<i>Peso a vuoto operativo</i>	pari al peso dell'aereo escluso il carico pagante e il peso del carburante;
<i>Carico pagante</i>	costituito dal peso dei passeggeri e da quello delle merci;
<i>Peso al decollo</i>	pari alla somma del peso a vuoto operativo, del carico pagante e del carburante;
<i>Peso all'atterraggio</i>	pari al carico al decollo dedotto il carburante consumato durante il volo.

La distribuzione dei carichi sui carrelli dipende dalla posizione del baricentro dell'aereo e dalla configurazione dei carrelli. Ogni carrello comprende una, due o quattro ruote. Nel caso di ruota singola si parla di "allestimento singolo", quando si hanno due ruote affiancate in direzione trasversale si parla di "ruote gemelle", quando le ruote sono affiancate in direzione longitudinale di "sistema tandem", nel caso, infine, di quattro ruote si parla di "allestimento a doppio tandem" (Figura 3. 4).

Eccetto pochi modelli militari, i velivoli poggiano su un ruotino-guida e due carrelli di atterraggio principali allocati sotto ogni ala. Questo tipo di organizzazione è definito sistema "a triciclo"; in esso, le due ruote principali sopportano la maggior parte del carico (fino all'80-90%). Le ruote sono collegate alla fusoliera mediante le "gambe di forza" che, grazie ad un sistema ammortizzatore pneumatico, garantiscono un morbido contatto con la pista. La gamba di forza anteriore ha scarsa funzione portante (su di essa grava circa il 10% del carico totale) ed è costituita da una sola ruota oppure da due ruote gemelle, inoltre essa ha la possibilità di



**Figura 3. 4** Tipologie di carrelli di atterraggio: a) allestimento a ruota singola; b) allestimento a ruote gemelle; c) allestimento a doppio tandem.

ruotare attorno al proprio asse così da consentire facilmente le manovre per terra una ruota.

In generale il danno indotto sulla pavimentazione è funzione del tipo, dell'entità e del numero di ripetizioni dei carichi; quest'ultimo deve essere definito tenendo conto del numero dei movimenti che effettua ogni aereo previsto su una data pavimentazione e il grado di dispersione delle traiettorie che caratterizza i singoli velivoli quando la percorrono.

L'introduzione dei fattori di equivalenza del danno rende comparabile i diversi danni dovuti alle diverse condizioni di carico e quindi alle diverse configurazioni di traffico (tipologia aeromobili, peso, numero e tempo di applicazione di carico, etc.), rapportandoli al danno atteso dal velivolo preso come riferimento.

In letteratura si distinguono due principali criteri di equivalenza del danno, sviluppati in ambito stradale, e sono (D'Apuzzo & Festa, 2004):

- **Criterio1:** *il danno è proporzionale all'area di impronta totale all'interfaccia pneumatico-superficie.* Più grande è tale area di contatto, maggiore sarà la superficie di pavimentazione trasversale sottoposta al carico trasmesso. In termini più generali, è possibile dire che un incremento del carico applicato, mantenendo una pressione di gonfiaggio costante, causa un allungamento dell'area di contatto. La lunghezza dell'impronta per certi tipi di pneumatici (di stessa taglia, fabbricazione, diametro e struttura) è piuttosto costante per normali valori di pressione e carico. In una condizione di sovraccarico (o bassa pressione di gonfiaggio), la lunghezza dell'impronta generalmente aumenta, più sui bordi che al centro. Viceversa, in una condizione di pressione eccessiva (o carico basso), la lunghezza dell'impronta generalmente diminuisce, di nuovo più ai bordi che al centro, risultando una forma più ellittica. In definitiva maggiore è l'area di contatto, tanto maggiore sarà il tempo di permanenza del carico dello pneumatico sulla superficie.
- **Criterio2:** *il danno è proporzionale al carico totale trasmesso dallo pneumatico alla pavimentazione.* Tale criterio deriva sostanzialmente dalle considerazioni fatte nel criterio 1, precedentemente illustrato; un'aliquota del danno alla pavimentazione può essere attribuita alla pressione verticale esercitata dalla ruota, che unita a quella

derivante dagli sforzi tangenziali esplicati in corrispondenza dell'area di impronta, si perviene alla derivazione del carico verticale totale.

Vi è poi un criterio del danno equivalente sviluppato secondo un approccio energetico, proposto da D'Apuzzo & Nicolosi.(2008), secondo cui il danno indotto dal singolo pneumatico alla pavimentazione è proporzionale all'energia dissipata nel processo di deterioramento della gomma del pneumatico stesso; in pratica l'energia responsabile dell'usura della gomma può essere considerata uguale a quella a cui attribuire il danno indotto alla superficie della pavimentazione.

Una volta valutato il numero di ricoprimenti  $NC_{i,j}$ , per un determinato punto distante  $\delta$  dall'asse pista, per ciascuno delle tipologie di aeromobili dello spettro, e scelto lo specifico criterio di equivalenza del danno da adottare, il numero di ricoprimenti equivalenti totali,  $ECs$ , può essere valutato come segue [3]:

$$[3] \quad ECs = \sum_i \sum_j \left( NC_{landing\_i,j}(\delta) \cdot DR_{landing\_i,j} + NC_{take-off\_i,j}(\delta) \cdot DR_{take-off\_i,j} \right)$$

Dove:

$DR_{landing/take-off\_i,j}$  rappresenta il danno relativo indotto dal  $j$ -esimo carrello dell' $i$ -esimo aeromobile nella fase di atterraggio o decollo, comparato a quello indotto dal carrello di riferimento in accordo allo specifico criterio di omogeneizzazione del danno impiegato.

### 3.3.1.3 Calcolo semplificato dei ricoprimenti equivalenti: *modello $N_{Ceq}$*

Nello sviluppo del modello semplificato, si è fatto riferimento al criterio di omogeneizzazione adottato nel modello ECs: assunta l'area d'impronta di forma ellittica, il fattore di equivalenza  $k_{i,j}$  è espresso come rapporto del diametro di impronta minore, relativo

al pneumatico dell' $i$ -esimo carrello del  $j$ -esimo tipo di aeromobile,  $a_{i,j}$ , e il diametro di impronta corrispondente al velivolo di riferimento,  $a_{rif}$ , esprimibili rispettivamente attraverso le espressioni [5] e [6]:

$$[4] \quad k_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{a_{rif}}$$

$$[5] \quad a_{i,j} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q_r}{p}}$$

$$[6] \quad a_{rif} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q_{rif}}{p_{rif}}}$$

Dove:

$Q_r$  indica il carico verticale su singola ruota del carrello  $i$ -esimo dell'aeromobile  $j$ -esimo [kg];  $Q_{rif}$  indica il carico verticale su singola ruota del carrello dell'aeromobile di riferimento [kg];  $p$  e  $p_{rif}$  sono le pressioni di gonfiaggio rispettivamente del  $i$ -esimo carrello e del carrello di riferimento [kg/cm<sup>2</sup>].

Secondo un tale approccio è necessario calcolare i ricoprimenti due volte, per l'atterraggio e per il decollo, e poi farne la somma; il carico verticale assume due diversi valori, ne derivano così due valori di  $a$ . Inoltre presuppone di conoscere le pressioni di gonfiaggio dei carrelli (posteriori e anteriore), in fase di decollo e atterraggio, oltre a conoscere i carichi verticali in corrispondenza degli stessi.

Sulla base di quanto detto finora, è stato proposto un modello semplificato di calcolo dei ricoprimenti equivalenti, nel quale tra le variabili di input, deducibili una volta noto lo spettro di traffico aereo, non compare più la pressione di gonfiaggio; inoltre in un'unica espressione si perviene al numero totale di ricoprimenti equivalenti, senza dover trattare separatamente le due condizioni, atterraggio e decollo.

Esprimendo quindi il fattore di equivalenza secondo la [7]:

$$[7] \quad keq_{i,j} = \left( \frac{Q_{i,j-takeoff/landing}}{Q_{rif}} \right)^{esp}$$

è stato ricavato il numero di ricoprimenti equivalenti,  $NC_{eq}$ , ottimizzato rispetto all'esponente  $esp$ , secondo l'espressione [8]:

$$[8] \quad NC_{eq} = K_{ampl} [F(x-d) + F(x+d) + K_f F(x)]$$

Dove:

- x** è la distanza del punto  $i$ -esimo dall'asse pista, in cui si vuole valutare  $NC_{eq}$ ;
- $NC_{eq}$**  è il numero dei ricoprimenti equivalenti calcolato in corrispondenza di  $x$ ;
- $K_{ampl}$**  è il fattore di amplificazione;
- $F(x)$**  è la Densità di Probabilità Gaussiana calcolata in corrispondenza di una certa distanza dall'asse pista, caratterizzata da una media nulla e deviazione standard pari al prodotto di  $\sigma_{sperimentale}$  (vedi **Tabella 3. 1**) per un coefficiente di riduzione,  **$K_{rid}$** ;
- d** è la distanza trasversale tra l'asse longitudinale dell'aeromobile  $j$ -esimo ed il carrello posteriore;
- $K_f$**  è definito coefficiente frontale;
- $\sigma_{sperimentale}$**  è la deviazione dall'asse pista delle traiettorie, osservata sperimentalmente e riportata in letteratura.

In particolare se  $N$  rappresenta il numero di operazioni/anno (atterraggi + decolli) del  $j$ -esimo aeromobile appartenente allo spettro di traffico, allora  $K_{ampl} / N$  e  $K_f$  possono essere espressi rispettivamente secondo la [9] e la [10]:

$$[9] \quad \frac{K_{ampl}}{N} = 3.164247 \cdot \left( \frac{P_{fm}}{P_{rif}} \right)^{1.170953} \cdot \left( \frac{P_{rm}}{P_{rif}} \right)^{-0.522306} \cdot \left[ \left( \frac{P_{rm}}{P_{rif}} \right) \cdot e^{0.01961543} \right]^{esp}$$

$$[10] \quad K_f = \left[ 0.261722 \left( \frac{P_{fm}}{P_{rm}} \right)^{-0.419483} \right] \cdot e^{\left[ 2.149699 \cdot \left( \frac{P_{fm}}{P_{rif}} \right) - 1.691769 \right] \cdot esp}$$

Dove:

- $P_{fm}$**  è il valore medio (tra atterraggio e decollo) dello scarico verticale del carrello anteriore;
- $P_{rif}$**  è il valore dello scarico verticale del carrello di riferimento;

- P<sub>rm</sub>** è il valore medio (tra atterraggio e decollo) dello scarico verticale del carrello posteriore;
- esp** è l'esponente funzione del criterio di omogeneizzazione del danno.

Infine il coefficiente riduttivo della deviazione standard,  $K_{rid}$ , può essere espresso come:

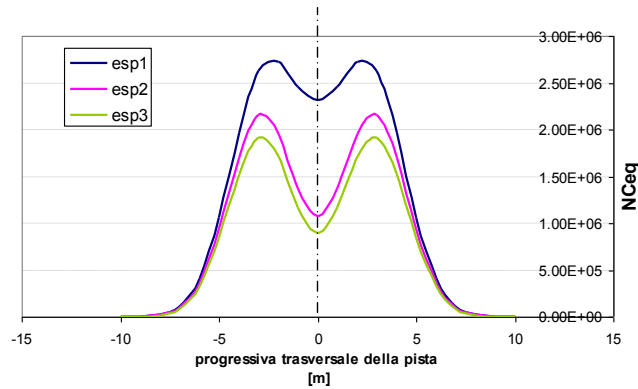
$$[11] \quad K_{rid} = 0.014106 \cdot \left( \frac{M_{aer}}{P_{rif}} \right) + 0.740786$$

Dove:

- M<sub>aer</sub>** è la massa totale media (tra atterraggio e decollo) dell'aeromobile;
- P<sub>rif</sub>** è il valore dello scarico verticale del carrello di riferimento.

Nel capitolo V è stata svolta un'analisi comparativa tra i risultati, in termini di ricoprimenti equivalenti, ottenuti implementando i due modelli sopra descritti, *ECs* e *NCeq*, per un caso studio.

In Figura 3. 5 si riporta, a titolo esemplificativo, le diverse curve di distribuzione dei ricoprimenti al variare dell'esponente.



**Figura 3. 5** Distribuzione tipo della funzione ricoprimenti in accordo ai diversi fattori di equivalenza.

## **IV    CAPITOLO**

### ***DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA***

#### ***PER L'ANALISI DEI PROFILI***

##### **4.1 PREMESSA**

Le sovrastrutture aeroportuali devono consentire agli aeromobili, sia in decollo che in atterraggio un moto esattamente regolare, senza perdita di aderenza, con minime resistenze all'avanzamento e minime azioni impulsive; queste ultime potrebbero produrre sensibili incrementi dinamici del carico, discomfort dei passeggeri, vibrazioni dannose alla strumentazione di bordo e, in qualche caso, anche rotture negli organi dei carrelli.

È noto che la regolarità della pavimentazione è in grado di influenzare notevolmente i diversi aspetti della manovra a terra dell'aeromobile, cui si faceva appena riferimento; la conoscenza quindi dal punto di vista quantitativo, dei fenomeni d'interazione pavimentazione - aeromobile che si innescano durante una qualsiasi manovra a terra, interessa praticamente tutte le entità che interagiscono nel fenomeno (l'utente, il pilota, la società di gestione dell'aeroporto, le case costruttrici di aeromobili e le compagnie aeree).

Alla base di un qualsiasi sistema di valutazione analitica della regolarità, assume un'importanza primaria, la conoscenza accurata del profilo della pavimentazione: i metodi attuali di misura sono in grado di restituire un'accurata riproduzione in scala del profilo.

Se da un lato l'introduzione di apparecchiature di misura dei profili ad alto rendimento ha facilitato le operazioni di rilievo, dando libertà di collezionare un quantitativo enorme di dati in tempi brevi, dal punto di vista delle metodologie di analisi degli stessi, non si sono registrati rilevanti passi avanti.

Avere molti dati non significa avere tante informazioni utili (Sayers & Karamihas, 1996). In altre parole, indagare in modo diretto sulla irregolarità, significa poter massimizzare

l'utilizzo dei dati collezionati nel dominio del tempo, e di generare maggiori benefici per scopi di ricerca e applicazioni.

Ciò concorda con l'obiettivo primario alla base della presente attività di ricerca, ovvero pervenire ad una caratterizzazione della variabilità longitudinale e trasversale della regolarità delle piste aeroportuali, e al tempo stesso ridurre opportunamente i dati ad una quantità necessaria per ricavarne informazioni mirate, finalizzate alla definizione di leggi di decadimento della caratteristica superficiale anzidetta.

Nel presente capitolo sono descritte alcune metodologie di analisi della irregolarità, nell'ottica di poterle mettere a confronto, ed in base ai risultati che ciascuna fornisce, poter successivamente indicare la metodologia generale o la combinazione di metodologie specifiche, in grado di fornire una più adeguata caratterizzazione di regolarità concorde con gli obiettivi proposti.

Il profilo di regolarità, in letteratura, quasi sempre è assimilato ad un processo aleatorio, stazionario ed ergodico, impiegando, nei processi di analisi, concetti puramente di Teoria dei Segnali.

Molteplici studi hanno evidenziato invece che tali posizioni comportano una valutazione distorta dei parametri di stato, in quanto il profilo di regolarità di una qualunque pavimentazione, nella sua globalità, è ben lontano dall'essere un processo stazionario.

Da ciò scaturisce che per meglio descrivere la sua non stazionarietà, un profilo di regolarità deve essere studiato come la sovrapposizione di due componenti:

- una componente “*stazionaria*”, per cui è lecito applicare le proprietà dei processi stazionari ed ergodici e descriverla con un livello di irregolarità medio;
- una componente “*transiente o isolata*”, fortemente non stazionaria, identificabile come *bump* o *depressione*.

Tuttavia, a oggi, non esiste un consenso comune su come la componente isolata debba essere identificata e separata dalla componente stazionaria; inoltre non è ancora chiaro in che misura una sequenza di eventi irregolari puntuali possa essere analizzata separatamente o deve essere considerata come un'unica sezione irregolare costante.



Prima di procedere con la descrizione delle varie metodologie di analisi comparate, si riporta un *framework* (Figura 4. 1) in cui, seppur in modo schematico e sintetico, sono evidenziate le fasi essenziali di analisi da sviluppare al fine del raggiungimento dell'obiettivo prefissato, con la descrizione dei rispettivi risultati attesi.

L'obiettivo finale è dunque quello di sviluppare un modello di degrado della regolarità in ambito aeroportuale le cui variabili sono: il traffico aereo (variabile indipendente) e l'irregolarità (variabile dipendente).

Per ciò che riguarda la variabile indipendente, vale a dire la descrizione del traffico aereo in termini di ricoprimenti equivalenti, si rimanda al capitolo III.

Nel presente capitolo invece saranno illustrate le tecniche investigate per il processo di analisi dei profili, il quale può essere articolato in tre fasi distinte:

- ✦ *Fase 1*- Individuazione della componente transiente nel profilo di regolarità;
- ✦ *Fase 2*- Rimozione della componente transiente dal profilo di regolarità;
- ✦ *Fase 3*- Individuazione della componente stazionaria nel profilo depurato.

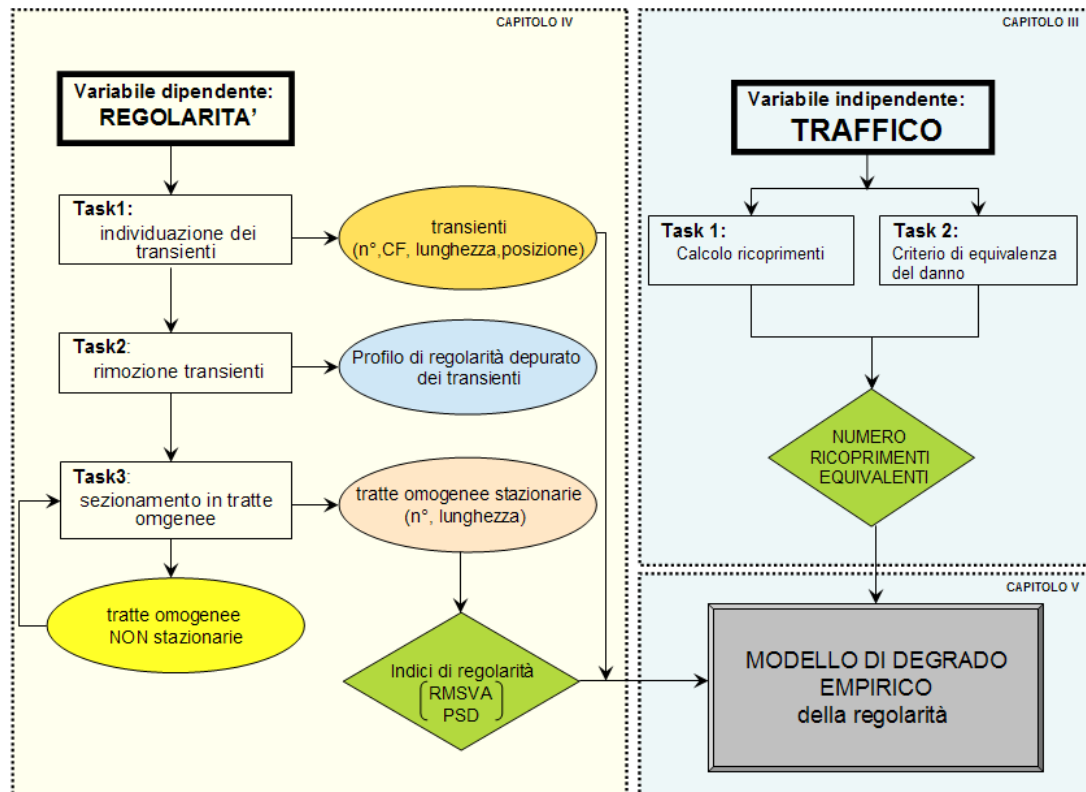
Queste sono ritenute essenziali per pervenire a una adeguata descrizione della irregolarità nelle sue due componenti principali suddette; in Tabella 4. 1 si riportano, per ciascuna fase, le rispettive tecniche di analisi studiate.

In particolare, sono state messe a confronto la teoria proposta da Rouillard e Bruscella (2001) e la tecnica di decomposizione wavelet al fine di individuare le componenti transienti presenti nel profilo di regolarità, e poterle caratterizzare in termini di numerosità, di posizione, di Crest Factor, di ampiezza ed estensione. Queste rappresentano al tempo stesso i dati in ingresso per le elaborazioni da intraprendere nelle fasi successive, ovvero Fase 2 e 3, nelle quali si intende rimuovere tali transienti dal profilo su cui sono stati individuati. Per la Fase 2 è stata individuata una tecnica di filtraggio impiegata, dagli studiosi americani che l'hanno proposta (Fernando & Rawool, 2005), per la "correzione" delle irregolarità puntuali superficiali delle pavimentazioni stradali. Inoltre è stato sviluppato un filtro ad hoc, al fine di operare un filtraggio "poco invasivo" nel rispetto del contenuto spettrale del profilo di partenza. Ottenuto il profilo depurato dei transienti, si può infine procedere al suo

**Tabella 4. 1** Fasi del processo di Analisi dei Profili suggerito.

<b>PROCESSO DI ANALISI DEI PROFILI</b>			
<b>Irregolarità:</b>	<b>Fase:</b>	<b>Risultato Atteso</b>	<b>Tecniche investigate</b>
TRANSIENTE	1	Caratterizzazione del transiente in termini di: numerosità, posizione, CrestFactor, estensione, e ampiezza	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teoria del Mean Square, <i>MS</i> (Rouillard &amp; Bruscella);</li> <li>Decomposizione Wavelet;</li> </ul>
STAZIONARIA	2	Profilo depurato dei transienti	<ul style="list-style-type: none"> <li>Filtro a frequenza cutoff;</li> <li>Filtro creato ad hoc;</li> </ul>
	3	Suddivisione del profilo depurato (Fase2) in tratte omogenee e stazionarie.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sezionamento Dicotomico (Lebas, 1981).</li> </ul>

sezionamento in tratte omogenee, mediante l'Algoritmo Dicotomico proposto da Lebas (1981); queste dovrebbero essere riconducibili alla componente stazionaria ricercata, e quindi, per ognuna di esse, ne è stata verificata la stazionarietà.



**Figura 4. 1** Framework per lo sviluppo di un modello di degrado della regolarità

Si precisa che gli algoritmi di rilevamento dell'irregolarità localizzata e i metodi di segmentazione sono stati opportunamente accoppiati al fine di valutare la combinazione ottimale per la valutazione del fattore di profilo. E poiché è possibile dimostrare che, se si detiene l'ipotesi di stazionarietà, l'elevazione della superficie stradale può essere stocasticamente descritta da una distribuzione gaussiana, l'efficacia di una specifica procedura di analisi globale è stata valutata eseguendo un test statistico sulle sezioni finali omogenee.

Nel dettaglio, sono stati eseguiti due test, Chi-Quadro e Kolmogorov-Smirnov (KS), per valutare la bontà di adattamento rispetto a una distribuzione normale per ogni tratta omogenea individuata dalla procedura di analisi specifica.

Si precisa che tra le tecniche selezionate per l'individuazione e rimozione dei transienti, solo l'analisi wavelet, è stata di recente impiegata anche per la valutazione della regolarità delle piste di volo; tutte le altre sono state sviluppate e validate in ambito stradale, ad eccezione fatta del filtro ad hoc, che è stato opportunamente introdotto per la prima volta in questa attività di ricerca.

## 4.2 INDIVIDUAZIONE DELLA COMPONENTE DI REGOLARITÀ *TRANSIENTE*

La completa descrizione di un processo di natura *random* è fornita in termini di valori della media e della deviazione standard, assumendo che lo stesso processo segua una distribuzione Gaussiana [12]:

$$[12] \quad p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

dove

$p()$  = probabilità;  $\sigma$  = deviazione standard;  $\mu$  = media.

Quando il processo è a media nulla, la deviazione standard coincide con la radice quadratica media (Root Mean Square, RMS). Per un dato processo, il grado di scostamento dalla distribuzione Gaussiana può essere descritto da parametri statistici del secondo ordine,

quale l'asimmetria e la curtosi; il primo rileva se e quanto una distribuzione non è distribuita simmetricamente attorno alla sua media, il secondo invece è un valore caratteristico atto a misurare quanto una distribuzione è piatta o allungata rispetto alla curva normale.

In generale però, il parametro impiegato per indicare la caratteristica transiente di una serie casuale di dati è il fattore di cresta (Crest Factor, *CF*), definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore di RMS, di un dato set di dati [13]:

$$[13] \quad CF = \frac{\text{valore di picco}}{RMS}$$

Una distribuzione di tipo Gaussiana, ha un valore di asimmetria pari a zero e un valore di curtosi pari a tre; per quanto riguarda invece il CF, il 99.7% dei dati che seguono una distribuzione normale presenta un crest factor inferiore a tre (Rouillard et al., 1999).

#### **4.2.2 Teoria della Media dei Quadrati (*Mean Square, MS*)**

Sulla base delle suddette considerazioni statistiche, i ricercatori Rouillard e Bruscella (2001) hanno sviluppato la teoria del Mean Square per la ricerca dei transienti, operando sulle accelerazioni spaziali dei profili di regolarità. La teoria adotta i seguenti criteri per poter classificare come *transiente* una data sezione del profilo:

1. Data una finestra mobile d'osservazione di 2.5 m, e individuato in esso il picco di MS, i punti di caduta di MS (drop point) nell'intorno del picco devono essere contenuti in essa; in tali punti inoltre i valori di MS devono risultare al di sotto, al più uguale, al 10% del valore di picco;
2. Il valore di CF relativo alla sezione osservata deve essere inferiore a 3.

In altre parole, una sezione del tracciato si definisce transiente se risultano verificate entrambi le condizioni 1 e 2; diversamente la sezione si considera stazionaria.

Gli autori inoltre sostengono che si perviene ad migliore caratterizzazione e classificazione dei profili di regolarità, esplicitando il profilo delle elevazioni in termini di accelerazioni spaziali; in tal modo gli eventi transienti sono maggiormente accentuati, quindi ne è facilitata la loro individuazione. Lo stesso Rouillard ( Bruscella & Rouillard, 1999), nella sua ampia attività ricerca volta alla classificazione dei profili di superfici stradali, finalizzata allo studio dell'interazione dinamica veicolo-pavimentazione e dei fattori che maggiormente la influenzano, è giunto alla conclusione che il fenomeno di interazione suddetto non può prescindere dal non considerare, insieme alle ampiezze, le caratteristiche di lunghezze d'onda della superficie stradale. Ampi valori di elevazione nei profili, non necessariamente causano elevate vibrazioni sul veicolo; quindi l'identificazione dei transienti (shocks) nel profilo richiede l'impiego di un parametro che sia sensibile alle velocità di variazioni spaziali delle elevazioni, ovvero l'accelerazione spaziale del profilo di elevazioni.

L'accelerazione verticale di un profilo, campionato con un intervallo  $dx$ , può essere ricavata dalla espressione [14] (Transport Canada, 2005):

$$[14] \quad VA(i) = \frac{y(i+k) + y(i-k) - 2 \cdot y(i)}{b^2} \quad [\text{mm/m}^2]$$

Dove:

- $y(i)$  è l'elevazione verticale del profilo nel punto  $i$ -esimo;
- $i$  è l' $i$ -esimo punto del profilo;
- $b$  è la semi-lunghezza base (m), ovvero la distanza tra il punto  $i-k$  e il punto  $i$  (oppure tra il punto  $i$  e il punto  $i+k$ );
- $k$  è il numero di punti che ricadono in  $b$ , dato da  $b/dx$ ;
- $dx$  è l'intervallo di campionamento, ovvero la distanza che intercorre tra due punti consecutivi del profilo.

Il calcolo della media dei quadrati delle accelerazioni spaziali, viene effettuato su finestra mobile di 0.5 m, con massima sovrapposizione, secondo l'espressione [15]:

$$[15] \quad MS_{VA}^2(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N VA_i^2(x)$$

Dove:

$MS_y^2(x)$  è la media dei quadrati (MS), espressa in  $\text{mm}^2/\text{m}^4$ ;

$N$  è la dimensione della finestra di osservazione, fissata pari a 0.5 m;

$VA_i^2(x)$  è il valore quadrato istantaneo delle accelerazioni spaziali,  $VA$ .

IL Root Mean Square delle VA, RMSVA, è indicato tra i parametri base per la definizione della distribuzione statistica dell'irregolarità. In Trasport Canada (2005) è riportata l'espressione matematica che consente di calcolare l'RMSVA di un dato profilo di regolarità, per una fissata lunghezza base,  $b$ , [16] :

$$[16] \quad RMSVA_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=k+1}^{i=n-k} VA(i)^2}{n-2k}} \quad [\text{mm}/\text{m}^2]$$

dove

$k$  è il numero di punti del profilo contenuti in  $b$  ( $k=b/dx$ );

$n$  è il numero di punti rilevati nel profilo;

$VA_i(x)$  è il valore delle accelerazioni spaziali nel punto  $i$ -esimo [ $\text{mm}/\text{m}^2$ ];

$dx$  è il passo di campionamento [m].

Il valore di RMSVA dipende dal valore della lunghezza base,  $b$ , in relazione alla lunghezza d'onda di irregolarità; il valore è massimo per una lunghezza d'onda di  $2b$  e nullo per lunghezze d'onda pari a  $b$ .

Di seguito si riporta una breve descrizione dell'algoritmo di analisi suggerito da Rouillard et al., le cui fasi principali sono illustrate in Figura 4. 2

In dettaglio, noto in ingresso il profilo di regolarità delle elevazioni verticali, si rappresenta quest'ultimo nel dominio delle accelerazioni spaziali, ( $VA$ ) e si valuta il MS, fissata la finestra mobile (0.5 m). Su questo, per una data finestra d'osservazione di ampiezza fissata (2.5 m), si individua il primo valore massimo di MS; si procede all'individuazione, a destra e a sinistra di tale punto, dei drop point, ovvero dei punti in cui l' MS assume valori minori o uguali al 10% del MS del massimo. Se tali punti esistono, affinché la sezione tra essi compresa possa essere

definita transiente, devono essere soddisfatti i due criteri: la distanza tra questi due punti deve essere inferiore a 2.5 m e il CF deve risultare maggiore di tre. Qualora le due verifiche fossero soddisfatte, si procede alla rimozione e alla registrazione del transiente, e si ricerca nel restante profilo il secondo massimo, e così via. In caso contrario invece si procede all'individuazione della sezione a RMS costante; partendo da una finestra base di 3.5 m, si computa il valore iniziale del RMS delle accelerazioni spaziali, poi gradualmente, incrementando di un punto per volta la finestra, procedendo a destra e sinistra del picco, arrestandosi quando, dal confronto del RMS relativo alla finestra ampliata di volta in volta con l'RMS di base iniziale, si verifica una variazione del 10% (in positivo e negativo). A questo punto viene computato l'RMS della sezione ultima, che sarà identificata proprio da tale valore, e si procede all'individuazione del successivo MS massimo.

Una limitazione di tale metodologia sta nel fatto che bisogna fare a priori delle posizioni circa le caratteristiche che definiscono il transiente; caratteristiche localizzate che non si adattano a tali assunzioni non verranno individuate, ma ciò non compromette la validità della procedura. Le fluttuazioni delle sezioni stazionarie e gli eventi transienti identificati possono essere considerati come due distinte variabili, le quali, se combinate, sono rappresentative della regolarità globale di profili delle pavimentazioni.

L'output di una tale procedura, alla fine del processo di analisi, è costituito da una serie di tratte stazionarie estrapolate dal profilo originale, classificate in base al livello di RMS, e un record contenente le ampiezze e le posizioni di tutti i transienti identificati.

Non appare chiaro come sia eseguita invece la rimozione di ciascun transiente.

Infatti, tale procedura è stata considerata nel presente lavoro solo in parte, cioè presa a riferimento per la sola individuazione delle irregolarità puntuali, affidandosi ad altre procedure per la rimozione dei transienti e la segmentazione in tratte omogenee, che saranno illustrate nei prossimi paragrafi.

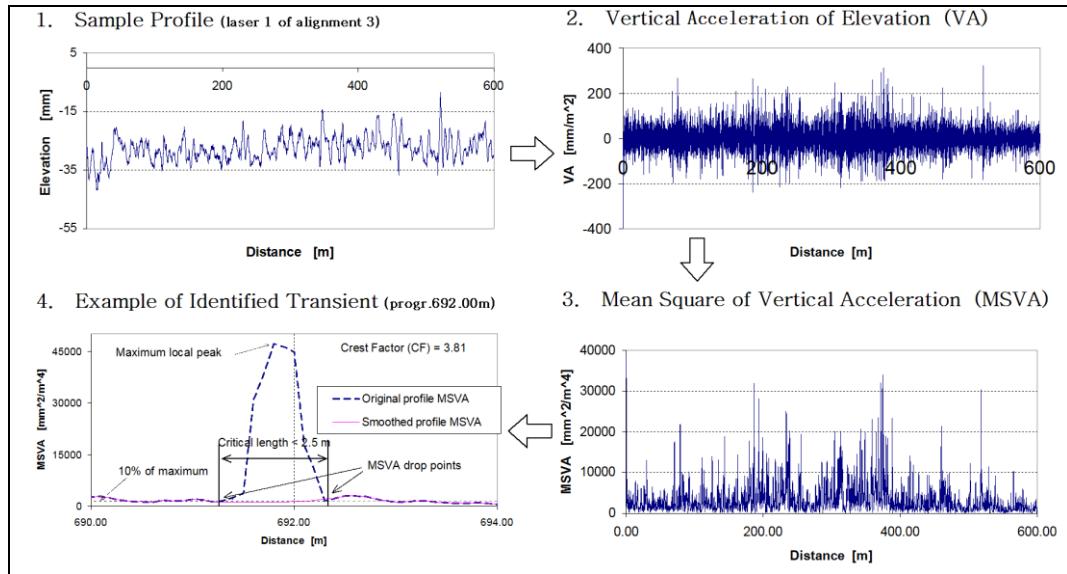


Figura 4. 2 Illustrazione schematica dell'algoritmo del MS.

### 4.2.3 Decomposizione Wavelet

L'Analisi Wavelet è correntemente impiegata nei processi di analisi dei segnali, ma sta da qualche anno guadagnando popolarità nel campo delle pavimentazioni. La teoria wavelet applicata allo studio della regolarità dei profili permette di ottenere informazioni dettagliate aggiuntive che, con gli indici sintetici di uso comune (e.g. IRI, RMSVA), non si riescono ad avere.

È noto che, in generale, l'interazione veicolo-pavimentazione nel dominio delle frequenze è stata tradizionalmente studiata attraverso la Trasformata di Fourier, FT, che consiste nel decomporre un segnale in una serie di sinusoidi di diverse frequenze e fasi.

La principale limitazione della FT è che ha una risoluzione in frequenza e non nel tempo (o nello spazio); in pratica ci fornisce l'informazione che una certa frequenza è presente nel segnale, ma non è in grado di stabilire quando essa compaia; quindi mal si presta all'analisi di segnali statisticamente non stazionari e avere informazioni a riguardo per l'analisi di regolarità dei profili è di fondamentale importanza (L.Wei&Fwa, 2004).



Come detto precedentemente, l'analisi di Fourier consiste nel decomporre un segnale in sinusoidi e similamente l'analisi wavelet decompone il segnale in versioni shiftate e scalate della wavelet originale (o onda madre) (A. Grap, 1995).

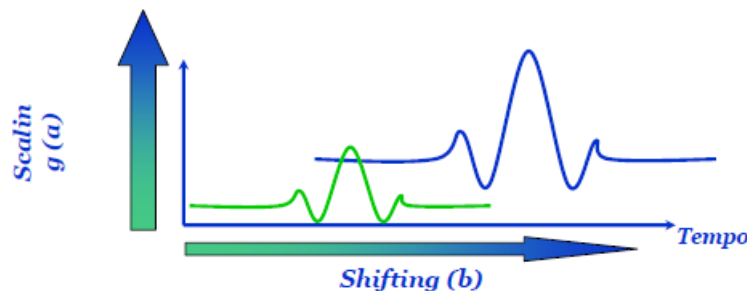
L'analisi wavelet si basa dunque sulla scelta della funzione analitica wavelet madre ( $\psi_0$ ) (Mother Wavelet), localizzata sia nello spazio di tempo che in quello di frequenza e  $\psi$  rappresenta la Wavelet Function normalizzata ad ogni scala.

La wavelet madre è scalata (ossia compressa) di un fattore "a" e shiftata di un fattore "b" (Coifman et al. 1992) secondo la seguente espressione matematica [17]:

$$[17] \quad \Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Se la wavelet è dilatata ( $a \gg 1$ ) contiene prevalentemente basse frequenze e fornisce un'approssimazione globale del segnale; se è compressa ( $a \ll 1$ ) contiene prevalentemente le alte frequenze e dà un'immagine dettagliata su una piccola porzione del segnale  $s(t)$ .

Lo shift avviene lungo l'asse del tempo e dunque se si sposta la funzione  $s(t)$  di una quantità positiva pari a "b" si otterrà semplicemente la funzione  $s(t-b)$  Figura 4. 3.



**Figura 4. 3** Proprietà della funzione wavelet: fattori di scaling e shifting.

In altri termini la trasformata wavelet, trasforma una funzione unidimensionale (funzione del tempo) in una bidimensionale funzione della scala e della traslazione. La sua applicazione quindi si ottiene nel modo schematizzato in Figura 4. 4, ossia si trasla la wavelet madre lungo

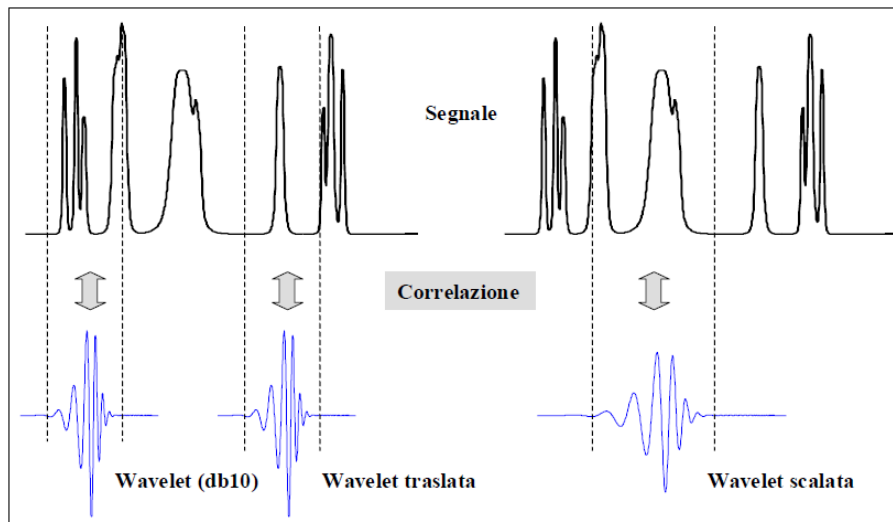
tutto il segnale e per ogni posizione si calcola la correlazione (che è una misura di somiglianza) tra essa e la porzione di segnale interessata. Poi si ripete la procedura con una versione scalata della wavelet madre e così via utilizzando di volta in volta wavelet a scala leggermente maggiore (o minore).

Alla fine di questo processo, ossia della Trasformata Wavelet, si ottengono i Coefficienti Wavelet, esprimibili attraverso la seguente relazione [18]:

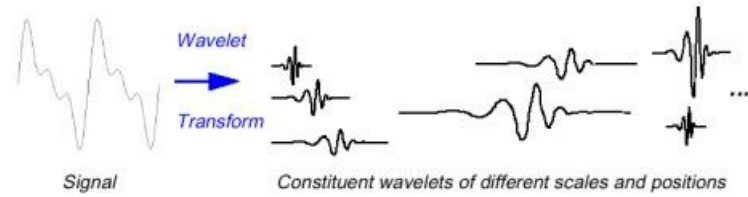
$$[18] \quad C(\text{scala}, \text{posizione}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi(\text{scala}, \text{posizione}, t) \cdot dt$$

Moltiplicando ciascun coefficiente per l'appropriata wavelet scalata e shiftata, si ottengono i costituenti wavelet del segnale originale (gli omologhi delle sinusoidi di diverse ampiezze e fasi in cui è scomposto un dato segnale con la FT).

Il coefficiente "C", in definitiva, rappresenta la correlazione tra la wavelet e la sezione di segnale per cui si è calcolato. Questo valore dipenderà dal tipo di wavelet che è stata scelta inizialmente (Mother Wavelet). Il procedimento si ripete diverse volte, ossia lungo tutto il segnale e si otterranno diversi coefficienti per ogni sezione.



**Figura 4. 4** Illustrazione schematica della trasformata wavelet



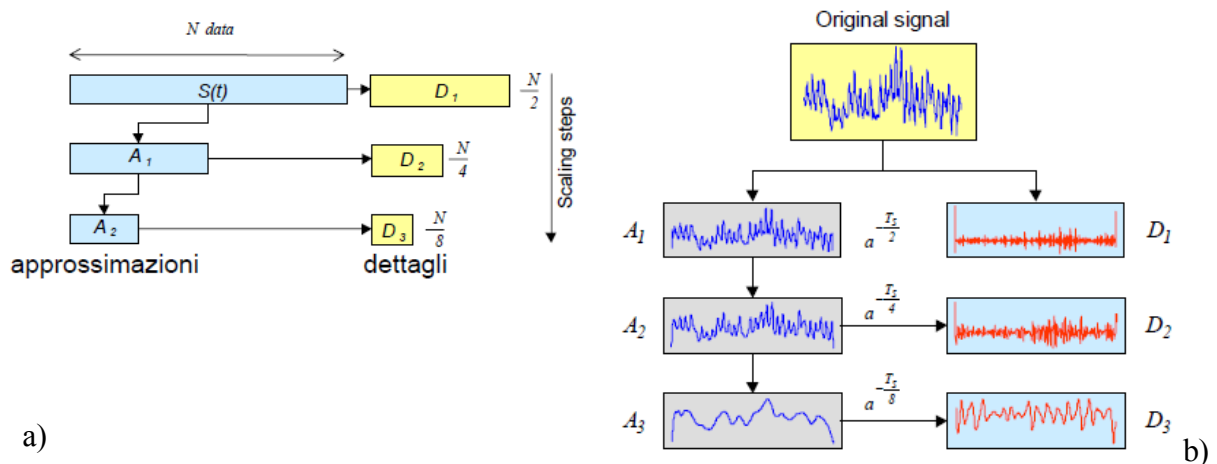
**Figura 4.5** Costituenti wavelet a differenti scale e posizioni

L'analisi wavelet può essere condotta impiegando una trasformata continua wavelet (CWT) che opera continuamente sulla scala e sposta le varie wavelet smussando su tutto il dominio del segnale analizzato, oppure impiegando la trasformata wavelet discreta (DWT) che invece permette di scegliere solo un set selezionato di frequenze di banda e posizioni.

In quest'ultimo caso, infatti, effettuando uno scaling diadico, in funzione della finestra di base di durata  $T_s$ , si ha la trasformata wavelet discreta (DWT) basata su potenze del 2 della finestra di base  $T_s$ :

$$\frac{T_s}{a^2}, \frac{T_s}{a^4}, \frac{T_s}{a^8}, \dots, \frac{T_s}{a^{2^n}}$$

e si ottiene una decomposizione gerarchica del segnale in termini di approssimazioni e dettagli che contengono rispettivamente la parte a basse frequenza ed ad alta frequenza del segnale. Procedendo per dimezzamenti successivi della scala si ottiene una *Decomposizione Multilivello (MD)* del segnale in successivi *Dettagli* ed *Approssimazioni*; ad ogni dimezzamento della finestra i dati disponibili si dimezzano (Figura 4.6).



**Figura 4.6** Decomposizione Discreta Multilivello: a) Schema e b) Output tipo.

In tal caso il segnale temporale  $s(t)$  originale, può essere rappresentato come la somma di una serie di segnali  $d_m(t)$  [19]:

$$[19] \quad s(t) = a_L(t) + \sum_{m=1}^L d_m(t) = a_L(t) + d_1(t) + d_2(t) + \dots + d_L(t)$$

dove ogni sottobanda del segnale,  $d_m$ , rappresenta un segnale di una preselezionata frequenza di banda  $m$  e il range di  $m$  ricopre l'intervallo totale delle frequenze di interesse.

Essenzialmente l'algoritmo di analisi wavelet elabora ripetutamente il profilo di regolarità a diverse scale o risoluzioni per decomporlo in diverse componenti di frequenze. Il processo dell'analisi wavelet è solitamente formulato in modo tale da identificare sia le grandi che le piccole caratteristiche localizzate. La derivazione matematica e l'analisi della trasformazione wavelet sono ben documentate in letteratura, per maggiori dettagli si può far riferimento ai lavori di Daubechies (1992), Meyer (1993).

Nelle applicazioni della teoria delle wavelet all'analisi delle irregolarità stradali e aeroportuali, è necessario prestare attenzione al fatto che i dati su cui si opera sono misurati ad intervalli di distanza costante lungo tutto il profilo; per tale motivo il segnale regolarità è registrato nel dominio delle distanze e non in quello temporale. Ciò tuttavia non influisce sull'applicazione della teoria wavelet ai profili; infatti, continuano ad essere valide tutte le equazioni viste finora, dove al posto del tempo  $t$  bisogna inserire il parametro distanza.

In Figura 4. 7 è riportato un esempio di decomposizione wavelet di un generico profilo stradale in sei sottobande di frequenze: si osserva come il profilo originale (primo in alto, in rosso) venga suddiviso in vere e proprie sottoclassi di frequenze, andando man mano ad evidenziare i vari transienti presenti, di cui è possibile conoscere contemporaneamente sia la posizione sia l'entità del "difetto", in termini di ampiezza.

L'ultimo sottoprofilo in basso,  $d_1$ , racchiude in sé le bande di frequenze più alte contenute nel segnale, e presumibilmente, dove sono facilmente visibili gli eventi di irregolarità puntuale.

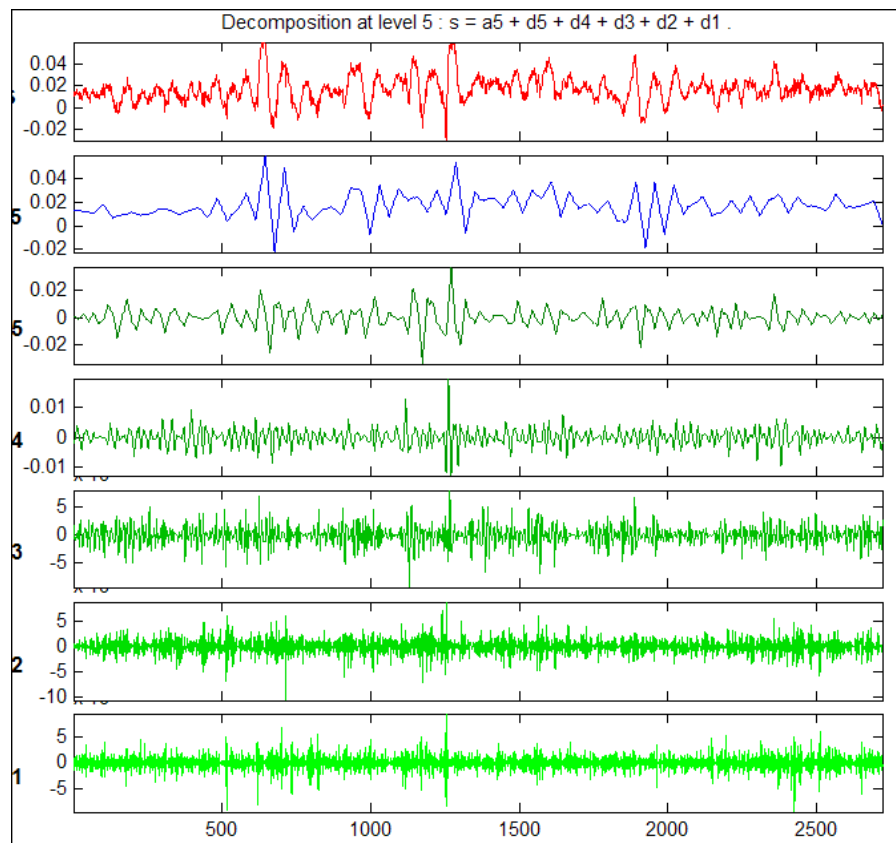


Figura 4. 7 Esempio di decomposizione wavelet di un profilo in sei sottobande di frequenza.

### 4.3 RIMOZIONE DELLA COMPONENTE *TRANSIENTE* DAL PROFILO

In generale, l'operazione di filtraggio dei profili di regolarità, rappresenta una parte fondamentale del processo di analisi, perché consente di “isolare” una determinata banda di lunghezze d'onda nel profilo grezzo (raw profile), eliminando tutte le altre informazioni. Un filtro digitale opera questa mirata selezione d'informazioni attraverso un'elaborazione matematica. Una tecnica ampiamente adottata nell'analisi dei profili, è il filtraggio con “filtro media mobile”: esso sostituisce il punto  $i$ -esimo del profilo grezzo, con la media dei  $k$  punti adiacenti ad  $i$ , ossia ricadenti nella finestra mobile di lunghezza-base  $B$  e centrata in  $i$ . Un tale filtro viene anche detto “low-pass”, poiché rimuove tutte le alte frequenze (i.e. le lunghezze d'onda brevi minori), conservando le basse frequenze (i.e. le lunghezze d'onda più lunghe), fornendo in output un profilo “smussato” rispetto al profilo grezzo di ingresso.

Nel caso specifico, una sorta di “filtraggio mirato” avviene già nella Fase 1 del processo di analisi che si sta illustrando, ossia quando si selezionano le tratte di profilo che hanno caratteristiche tali da poter essere definite transienti ( $CF > 3$  e  $L < 2.5m$ ).

Il filtraggio serve, in tal caso, per elaborare un “profilo sostitutivo” che serva a rimpiazzare il profilo originale in quei tratti transienti e permetta di:

- a) Ottenere in output un profilo depurato dei transienti;
- b) Conservare lo sviluppo longitudinale di ciascun profilo analizzato, preservando allo stesso tempo l'allineamento degli stessi profili in senso trasversale alla pista.

Il punto b) rappresenta un aspetto fondamentale per lo studio della variabilità trasversale della regolarità della pista, soprattutto se la finalità è pervenire a un modello di degrado, correlando la caratteristica della pavimentazione ai movimenti dei velivoli, e quindi al danno che ne consegue per effetto delle diverse traiettorie trasversali degli aeromobili.

#### **4.3.4 Filtro a riduzione di contenuto spettrale (cutoff frequency)**

L'algoritmo proposto da alcuni ricercatori americani (Fernando et al., 2005), sviluppato in ambito stradale e impiegato per l'individuazione e la rimozione dei transienti, si basa sul confronto tra il profilo originale e uno “smussato” (smoothed) ottenuto applicando all'originale un filtro che rimuove il contenuto spettrale superiore ad una frequenza cutoff (0.0748 cicli/m), scelta a fronte di considerazioni statistiche fatte sulla funzione Gain dell'IRI. Quando la differenza tra il profilo originale delle elevazioni e il profilo smussato supera un valore limite di soglia,  $\Delta$  (3.881 mm), il metodo classifica tale punto come irregolarità puntuale e la sezione locale nel suo intorno è rimossa e sostituita con la sezione di profilo smussato corrispondente.

Questo metodo è sensibile al valore associato alla soglia  $\Delta$ , per quanto riguarda la ricerca delle irregolarità, e alla frequenza cutoff adottata per eliminare il contenuto spettrale di non

interesse. Inoltre occorre notare che il lavoro di Fernando non è stato, in verità, esplicitamente sviluppato nell'ottica di operare una successiva riduzione in tratte stazionarie del profilo stradale, bensì rivolto alla mera localizzazione delle irregolarità puntuali al fine di mettere in atto azioni di ripristino e di riabilitazione della superficie della pavimentazione stradale.

Per tale motivo nelle applicazioni di tale metodo al caso studio illustrato nel capitolo successivo, si farà riferimento a questo approccio solo per ciò che concerne la sostituzione del transiente e non per l'individuazione degli stessi; quindi si farà riferimento ad esso solo per ricavare operare il taglio del contenuto in frequenza superiore alla frequenza di cutoff prescelta sul profilo originario per ottenere quello “addolcito”.

#### 4.3.5 Filtro creato ad *hoc* (K2)

Il principio di funzionamento del filtro creato, K2, è lo stesso del filtro sopra descritto, ovvero sostituire un profilo “smussato” al profilo grezzo in corrispondenza dei transienti individuati. Nel filtro a riduzione di contenuto spettrale però, fissando la *cutoff frequency*, si fissa indirettamente il grado di addolcimento da operare sul profilo grezzo e questo si conserva per l'intero profilo; il filtro K2 invece, per com'è stato concepito, calibra la propria capacità di “smooth out” in funzione delle caratteristiche specifiche della singolarità da rimuovere ( $CF$ ,  $X_s$ ,  $L_t$ ), secondo la seguente relazione:

$$[20] \quad K2 = \left( \frac{CF - 1}{2} \right) \cdot \left[ 1 - \cos \left( 2 \cdot \pi \cdot \left( \frac{X_s}{L_t} \right)^a \right) \right] + 1 \quad \text{con} \quad a = \frac{\ln(0.5)}{\ln \left( \frac{X_s}{L_t} \right)}$$

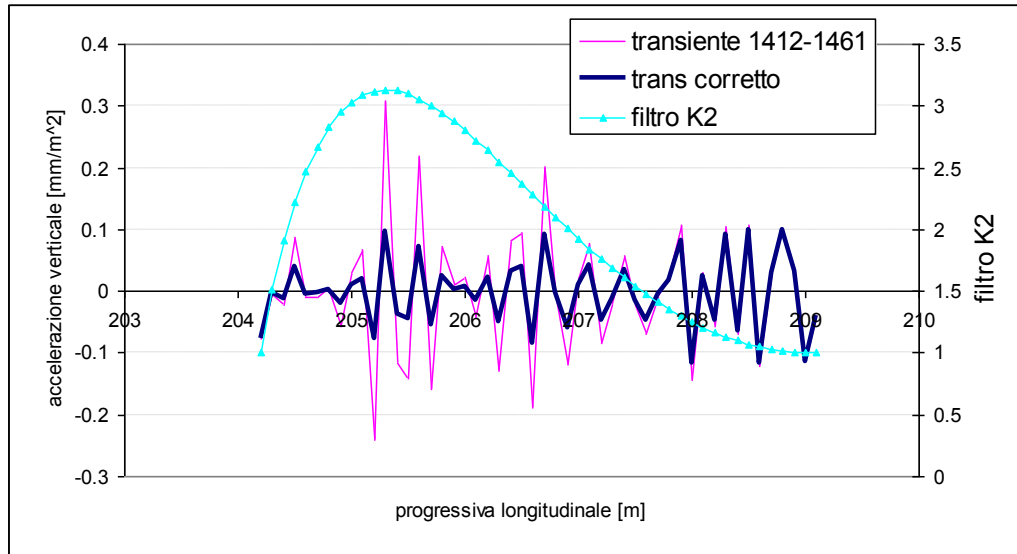
dove:

$CF$  è il Crest Factor che caratterizza il transiente  $i$ -esimo;

$X_s$  rappresenta il valore di picco del transiente  $i$ -esimo;

$L_t$  è l'estensione del transiente  $i$ -esimo.

Nella Figura 4. 8, si riporta a titolo semplificativo, una rappresentazione di un transiente tipo (in magenta), la funzione filtro K2 (in ciano), e il transiente filtrato con K2 (in blu). Si può osservare come l'effetto di “smooth out” sia più marcato in corrispondenza del picco (e.g. intorno ai 205.50 m) e meno evidente altrove (e.g. sui punti estremi); inoltre è in grado allo stesso tempo di conservare la frequenza dei picchi.



**Figura 4. 8** Rappresentazione di un transiente tipo, prima e dopo il filtraggio con filtro K2

#### **4.4 SEZIONAMENTO IN TRATTE OMOGENEE**

Per *sezione omogenea* si intende una parte del tronco stradale in cui una specifica caratteristica, come ad esempio la regolarità superficiale, l'aderenza, il traffico giornaliero medio oppure il tipo di pavimentazione, risulta costante, uniforme. Secondo l'attributo esaminato, esistono diverse sezioni omogenee per uno stesso tratto stradale.

La determinazione delle sezioni omogenee è importante perché è da considerarsi legata ad una corretta organizzazione della base dati del sistema di gestione delle pavimentazioni, ad una logica individuazione delle sezioni di analisi che aiuta ad ottimizzare gli interventi di manutenzione, ma soprattutto perché rappresenta una valida partenza per determinare le curve di degrado della pavimentazione; infatti difficilmente ci si può aspettare un buon modello previsionale basandosi su misure che nella realtà non sono uniformi.



I profili di regolarità, misurati con l'ausilio delle apparecchiature ad alto rendimento, sono visti come "serie temporali"; dove la successione di osservazioni è ordinata logicamente secondo la variabile chilometrica e non quella temporale. Inoltre, come per le serie temporali, se una tratta del profilo è caratterizzato da valori medi invarianti rispetto alla progressiva, viene definita stazionarie; è quindi possibile attribuire a ciascuna tratta un unico dato, ossia il valore medio del parametro in esame.

Tra i diversi criteri che possono essere applicati per la determinazione delle sezioni omogenee, vi sono quelli statistici, basati proprio sull'assunzione che le misure di un qualsiasi attributo, se effettuate lungo un tronco stradale con frequenza spaziale costante, presentano una struttura tipica delle serie temporali, e come tali potrebbero essere analizzate ricercando le tratte in cui la serie si presenta stazionaria. In questi tratti le misure effettuate si presentano identicamente distribuite e possono essere quindi rappresentate conoscendo i parametri della legge densità di probabilità.

Tutti i criteri di tipo statistico sono caratterizzati dalla ricerca, all'interno della serie di dati, dei *break point*, intesi come quei punti che individuano un cambiamento brusco nell'andamento dei dati, non necessariamente visibile, ma tale che il modello statistico che rappresenta la serie di misure, sia diverso. Tale diversità può essere associata alla variazione di un parametro, come ad esempio il valore medio o la varianza.

In letteratura tecnica, tra i metodi introdotti per individuare le sezioni omogenee a partire da una serie di dati misurati, sono annoverati: il metodo della somma o differenze cumulate (CUMSUM), il metodo del minimo scarto quadratico (MINSSE), il metodo Bayesiano e il metodo dicotomico basato sullo scarto (LCPC).

Il presente lavoro si limiterà a descrivere i principi di funzionamento dell'ultimo metodo citato, il metodo dicotomico, in quanto ritenuto il più adatto per le finalità dello studio.

#### **4.4.1 METODO DI SEZIONAMENTO DICOTOMICO (FRANCESE)**

Il metodo in esame è stato proposto dal LCPC ( Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ) e consiste nello scomporre la serie di dati misurati in un certo numero di sezioni omogenee, all'interno delle quali ha senso parlare di media e varianza della grandezza misurata, ma che allo stesso tempo presentano tra di loro scarti tra i valori medi significativi (Lebas et al., 1981).

Ciò avviene con l'ausilio di due criteri:

- ✓ un criterio di verifica dell'omogeneità dei dati all'interno di una sezione;
- ✓ un metodo di suddivisione in grado di individuare il punto in cui si verificano variazioni significative nella sequenza dei dati.

La descrizione in dettaglio dei suddetti criteri è riportata in APPENDICE A, mentre di seguito è illustrato l'algoritmo generale nel quale tali criteri possono essere combinati per l'individuazione delle sezioni omogenee all'interno delle misure rilevate su una pavimentazione stradale o aeroportuale.

Il metodo dicotomico proposto dal LCPC ha quindi il pregio di poter essere implementato in una procedura di calcolo iterativa in cui gli unici parametri arbitrari sono:

- la probabilità di falso rifiuto,  $\alpha$ ;
- la numerosità minima del campione,  $N_{min}$ .

Di contro tale metodo presuppone che la serie di misure siano effettuate con passo costante e non presentino variazioni sistematiche (trend) o correlazione tra i dati stessi.

Inoltre, occorre osservare che l'estensione delle tratte omogenee individuate con tale procedura risulta sensibilmente condizionata dal numero minimo di dati assunto per la individuazione di una tratta,  $N_{min}$ ; al diminuire di quest'ultimo aumenta il numero di tratte.

L'algoritmo iterativo si sviluppa secondo le seguenti fasi:

**Fase 1.** Si effettua il test di omogeneità sulla tratta su cui sono state effettuate le N misure, se è verificato essa costituisce un'unica sezione omogenea e si associano ad essa gli indicatori caratteristici (valore medio e varianza della grandezza misurata), in caso contrario si passa alla fase successiva.

**Fase 2.** Se sono state individuate variazioni lente, o gruppi di dati anomali ( $u > u_{1-\alpha}$ ), viene applicato il criterio di suddivisione, si calcolano gli N valori della funzione:

$$g(k) = \frac{N}{k \cdot (N - k)} \left( \sum_{j=1}^k y_j \right)^2 \quad 1 \leq k \leq N-1$$

dove:

- $y_j = x_j - \bar{X}$
- $x_j$  è il valore dell'attributo misurato sperimentalmente in sito nel punto j-esimo,
- $\bar{X}$  è il valore medio delle misure effettuate sull'intero tronco stradale.

La tratta in esame viene suddivisa in due tratte minori in base al break point individuato, che coincide con la progressiva della misura  $x_{k_{max}}$  a cui corrisponde il massimo della funzione  $g(k)$ . Indicando con  $k_{max}$  la posizione del massimo di  $g(k)$ , la prima tratta ottenuta risulta essere costituita da  $k_{max}$  misure, comprese tra la prima e  $x_{k_{max}}$  (il break point individuato), la seconda è invece costituita da  $(n - k_{max})$  misure, comprese tra  $(x_{k_{max}} + 1)$  e l' n-esimo punto di misura.

**Fase 3.** Si applica il test di omogeneità alle due tratte individuate nella fase precedente.

**Fase 4.** Le tratte che soddisfano il criterio di omogeneità nella Fase 3 costituiscono sezioni omogenee, quindi si possono assegnare i valori caratteristici dell'attributo in esse misurato (valore medio e varianza campionaria); per le tratte che non soddisfano il criterio di omogeneità si applica nuovamente la procedura di suddivisione illustrata nella Fase 2, in cui si pone  $N = k_{max}$  per la prima tratta non omogenea e  $N = N - k_{max} + 1$  per la seconda tratta non omogenea. Si applica quindi il test di omogeneità alle successive tratte individuate.

**Fase 5.** Si procede fino a quando per tutte le sezioni individuate dalla suddivisione, tramite la ricerca del valore massimo di  $g(k)$ , è soddisfatto il criterio di omogeneità, o fino a che le sezioni individuate non contengono un numero di misure limite  $< 25$ , al di sotto del quale vengono meno le condizioni di applicabilità dei criteri statistici.

#### **4.4.2 VERIFICA DI STAZIONARIETÀ DELLE TRATTE OMOGENEE**

Una volta ottenuto un profilo privo di difetti puntuali, e suddiviso in tratte omogenee presumibilmente stazionarie, si procede alla verifica dell'effettiva stazionarietà delle singole sezioni, attraverso opportuni test da individuare nell'ambito delle scienze econometriche.

Infatti, le tratte omogenee così individuate non sono necessariamente stazionarie.

L'efficacia globale, come già anticipato all'inizio del capitolo, degli algoritmi di rilevamento dell'irregolarità localizzata e del metodo di segmentazione finora descritti, opportunamente abbinati al fine di valutare la combinazione ottimale in grado di fornire la migliore valutazione dell'irregolarità del profilo, è stata valutata eseguendo dei test statistici sulle sezioni finali omogenee.

In particolare, sono stati eseguiti i test Chi-Quadro e Kolmogorov-Smirnov (KS), per valutare la bontà di adattamento rispetto a una distribuzione normale per ogni tratta omogenea individuata dalla procedura di analisi specifica; infatti, per un processo stazionario, la funzione densità di probabilità dei dati si distribuiscono secondo una Normale.

Si riportano in APPENDICE B le condizioni di validità e applicabilità dei suddetti test di adattamento.

## **V      CAPITOLO**

### ***APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA AD UN CASO STUDIO:***

#### **Analisi Dei Profili Acquisiti Sulla Pista Dell'Aeroporto "G.B.Pastine" di Ciampino**

Nell'Aeroporto di Roma G.B.Pastine, in Ciampino è stata condotta una campagna di indagine, articolata in due giornate di misure, nel periodo 26 e 27 Giugno e 27 Luglio 2007, dal Gruppo di Ricerca in carica, nel suddetto periodo, al Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti "L.Tocchetti" Federico II di Napoli, guidato dal prof. ing. Bruna Festa.

Le applicazioni e gli studi presentati in questo lavoro, sono state possibili grazie alla base dati raccolta durante l'esperienza di indagine suddetta.

### **5.1 DESCRIZIONE DEL SITO INDAGATO**

Di seguito, brevi cenni storici aiuteranno ad avere un quadro conoscitivo completo dell'area indagata e una descrizione più dettagliata della pista di volo oggetto di indagine.

**Cenni storici.** L'aeroporto di Roma-Ciampino, dedicato a Giovan Battista Pastine, con oltre 5 milioni di passeggeri l'anno è il secondo scalo di Roma, dopo l'aeroporto Leonardo da Vinci di Fiumicino. Le sue attività sono dedicate prevalentemente ai voli charter e low-cost come: Ryanair, EasyJet, Centralwings e Wizz Air. È formato da un solo Terminal e la vicinanza con i centri abitati ne ha impedito un suo ulteriore sviluppo.

La sua costruzione risale al 1916. Inizialmente utilizzato come base di dirigibili, nel 1924 la sua attività di volo si sviluppò con l'introduzione di reparti da caccia e bombardamento.

Dalla fine degli anni '40 e per tutti gli anni '50, l'aeroporto fu gradualmente potenziato per far fronte al traffico commerciale. Oltre ad una nuova pista di 2207 m furono realizzate un'aerostazione per velivoli internazionali, vari edifici tecnici e l'aerostazione nazionale.

Fino ai primi anni '60, è stato il principale aeroporto di Roma gestendo un traffico massimo di circa 2.500.000 passeggeri all'anno. Dopo l'apertura dell'aeroporto Leonardo da Vinci, avvenuta nel gennaio 1961, fu destinato prevalentemente ai voli militari, charter e dell'aviazione generale con un volume di traffico inferiore ai 800.000 passeggeri all'anno.

Dal 2001, con l'introduzione dei viaggi low-cost, il volume di traffico di Ciampino si è quadruplicato.

Nel 2007 lo scalo di Ciampino ha accolto circa 5,4 milioni di passeggeri, ma il trend è di flessione per il trasferimento, soprattutto negli ultimi 12-18 mesi, dei voli sullo scalo di Fiumicino, e un blocco degli *slots* (tempo che un determinato volo ha a disposizione su di un aeroporto per soddisfare le sue esigenze commerciali, come sbarco e imbarco dei passeggeri e dei bagagli, rifornimento di carburante, catering, ecc..) disponibili per le compagnie rimanenti.

Per quanto riguarda la componente militare, nell'Aeroporto di Ciampino sono presenti il 31° Stormo "Carmelo Raiti" ed il 2° RGAM (Reparto Genio Aeronautica Militare).

Il compito principale dello Stormo è di assicurare il trasporto delle Autorità dello Stato, trasporti sanitari d'urgenza, voli sanitari e/o umanitari.



**Figura 5. 1** Foto da satellite: a) vista dall'alto e b) vista laterale nella direzione 15-33.

**Caratteristiche della pista di volo.** L'aeroporto di Ciampino ha un'unica pista, orientamento 15/33, della lunghezza di 2.207 m per una larghezza di circa 45 m e la direzione di atterraggio e decollo normalmente utilizzata è dal 15 verso il 33. Il manto di usura della pista è in conglomerato bituminoso; lo spessore dello strato di binder varia da un minimo di 4 cm ad un massimo di 7 cm; lo spessore dello strato di usura è di 3 cm.

La miscela è stata realizzata nel biennio 1990-1991; è stato utilizzato un bitume 80-100 in percentuale pari al 5,2%; la percentuale dei vuoti è pari al 4,2%.

La pavimentazione ha subito nel tempo diversi interventi di rifacimento dello strato superficiale, di cui non si ha traccia, se non una parziale localizzazione per mezzo di foto satellitari di archivio dal sito Google Heart. Ad ogni modo, ignorare l'effettiva localizzazione degli interventi, non fa che incrementare le aleatorietà e le imprecisioni, che già governano il problema.

## 5.2 DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

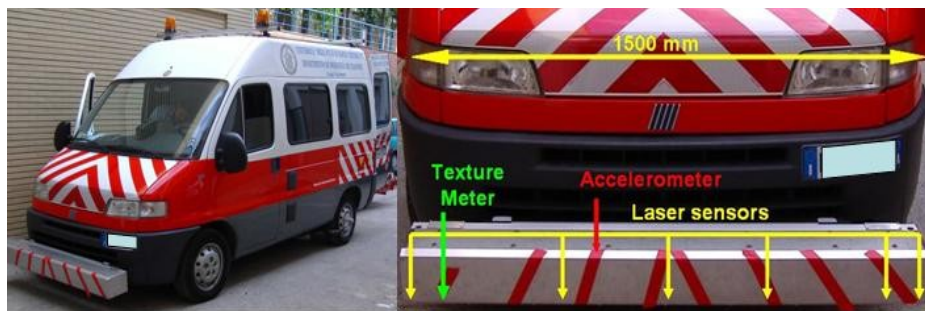
Le misure dei profili di regolarità sono stati ottenuti mediante un profilometro laser ad alto rendimento, operante presso il Centro Regionale di Competenza Trasporti finanziato dalla Regione Campania e disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “L.Tocchetti”.

Nello specifico l'apparecchiatura è composta da 7 sensori laser di tipo inerziale montati su di una barra posta anteriormente al veicolo di dimensioni pari a 150 cm (Figura 5. 2) che consente il rilievo contemporaneo secondo sette allineamenti longitudinali diversi del profilo.

Nel sistema di misura è integrato un odometro collegato al sistema di acquisizione che permette di misurare le progressive in cui si eseguono le misure.

Le caratteristiche dei sensori laser sono le seguenti:

- |  |  |
|--|--|
| – Dispositivo di Classe 1 (ASTM E950); | 1. Passo di campionamento minimo:<br>< 5 mm; |
| – Frequenza di campionamento: 16 kHz;  | – Intervallo di misura: 200 mm;              |
| – Risoluzione verticale: 0.05 mm;      | – Velocità di funzionamento: 25-150 km/h.    |



**Figura 5. 2** Profilometro laser impiegato( a sinistra) e layout delle posizioni dei laser sulla barra(a destra).

Nella fase di acquisizione dei profili con l'apparecchiatura ad alto rendimento, sono stati complessivamente rilevati, per 12 allineamenti trasversali alla pista, un ammontare di  $12 \times 6 = 72$  profili longitudinali di regolarità, di lunghezza variabile tra 1750 e 1850 m, acquisiti con passo di campionamento pari a 0.10 m.

In Tabella 5. 1 si riporta il codice identificativo con cui è stato catalogato ciascun profilo e la corrispondente progressiva trasversale, misurata rispetto all'asse della pista. Il suffisso *A* sta per “Allineamento”, inteso come singola strisciata di misura eseguita con il profilometro laser, a partire

dalla testata 15 e procedendo verso la testa 33; il numero indica l'ordine progressivo in cui è stata eseguita la corsa di misura; per ogni strisciata sono stati misurati 7 profili (uno per ciascun sensore laser montato sulla barra frontale), di cui 6 adibiti al rilievo della regolarità e 1 alla misura di macrotestitura; nel caso in esame si fa riferimento alle misure di 6 laser, ciascuno dei quali è indicato con il suffisso *L* seguito dal numero identificativo della posizione occupata dal laser sulla barra (e.g. A12\_L5 identifica il profilo misurato la laser 5, nella strisciata o allineamento di misura numero 12).

Per ciò che concerne i rilievi dei volumi e dello spettro del traffico aereo che interessa l'aeroporto di Ciampino, si è fatto riferimento all'indagine condotta da Festa et al.(2008), prendendo in esame tutti i movimenti (atterraggi e decolli) relativi agli anni che vanno dal 1992 fino al 2006; emerse da tale studio che l'80% del volume di traffico è dovuto solo a 12 tipologie di aereo a fronte delle 70 che definiscono lo spettro di traffico. Quindi, per il calcolo dei ricoprimenti equivalenti, illustrati nei prossimi paragrafi, si farà riferimento ai movimenti totali relativi alle 12 tipologie di aeromobili (Tabella 5. 2), assumendo come aeromobile di riferimento il Boeing 737-800 pax (Festa et alii, 2008).

ID allineamento	ID profilo	progr trasv [m]
A12	L5	-9.25
A13	L3	-6.6
A11	L4	-1.9
A10	L1	-1.85
A1	L2	0.7
A3	L5	3.85
A2	L6	5.75
A4	L4	7.3
A5	L3	10.3
A6	L6	12.25
A7	L2	13.6
A8	L1	16.05

**Tabella 5. 1** Codice identificativo e progressiva trasversale di ciascun profilo indagato nell'analisi preliminare.

### **5.3 ANALISI PRELIMINARI**

L'obiettivo primario della presente attività di ricerca è definire un modello evoluto di rappresentazione dei profili, che raggruppi nelle due componenti, isolata e stazionaria,

L'irregolarità delle piste di volo, al fine di pervenire allo sviluppo di modelli di degrado della regolarità delle pavimentazioni aeroportuali. In quest'ottica, il primo passo da compiere è quello di



estendere al caso aeroportuale i modelli, già consolidati per le pavimentazioni stradali, descritti nel capitolo IV.

Si è ritenuto opportuno quindi condurre un'analisi preliminare che mettesse a confronto le diverse metodologie, attraverso una procedura step-by-step (Parte1, Parte 2 e Parte3) applicate su un campione di misure tra quelle acquisite, per poter individuare una procedura globale di ottimizzazione, validata sulle restanti misure a disposizione, atta a ridurre un profilo arbitrario al minor numero di tratte stazionarie e di irregolarità singolari, di rilevante interesse per l'Ente Gestore; al tempo stesso introdurre nuove metodologie per lo sviluppo dei modelli di degrado in ambito aeroportuale, inserendo variabili indipendenti in grado di catturare esaustivamente l'interazione pneumatico – pavimentazione.

Dati di Traffico					
Anno	Movimenti annuali	Tipologia di aeromobile	Spettro per anno [%]		
			2004	2005	2006
1994	16785				
1995	18191	Boeing 737-800 pax (aeromobile di riferimento)	47.96	49.73	47.41
1996	18310	Airbus A319	3.009	10.74	15.764
1997	18628	Beechcraft light aircraft	3.207	2.69	2.93
1998	16366	Boeing 737-300 pax	5.654	3.131	2.703
1999	17605	Airbus A320-100/200	3.225	2.394	2.334
2000	19758	LET 410	3.104	2.308	2.317
2001	18042	Gates Learjet	3.28	2.198	2.259
2002	22315	Boeing 737-700 pax	0.862	0.482	1.234
2003	30280	Boeing 737-500 pax	2.275	1.119	1.215
2004	37036	Boeing 737-400 pax	0.418	0.636	1.18
2005	49915	Fokker F.27 Friendship / Fairchild F.27	2.924	1.716	1.141
2006	57195	Airbus Industrie A300 pax	2.913	2.095	1.055

**Tabella 5. 2** Traffico aereo dell'Aeroporto di Ciampino G.B.Pastine: volumi e spettri.

### **5.3.1 METODOLOGIE A CONFRONTO: PARTE 1**

In questa prima fase di analisi sono state messe a confronto, per la ricerca dei transienti, la Teoria del MS, da sola o combinata con la decomposizione Wavelet, adottando in entrambi i casi il filtraggio con rimozione di contenuto in frequenza e il sezionamento dicotomico, rispettivamente per rimuovere i transienti e sezionare in tratte omogenee ciascun profilo depurato.

Per svolgere l'analisi preliminare comparativa sono stati selezionati, tra le misure sperimentali disponibili, 12 profili abbastanza distribuiti trasversalmente su tutta la larghezza della pista. Questi sono stati espressi in termini di accelerazioni verticali,  $VA$ , per due principali motivi:

- Si eliminano, in tal modo, tutte le lunghezze d'onda dovute alle caratteristiche geometriche della pavimentazione, e.g la pendenza; altrimenti, diversamente, si dovrebbe operare, su ciascun profilo, una procedura di filtraggio ulteriore (nota come *de-trendizzazione*);
- Esprimere i profili in termini di accelerazioni verticali, secondo l'algoritmo di Rouillard, rende più efficace la ricerca e l'individuazione delle irregolarità puntuali.

In Figura 5. 3, a titolo di esempio, è rappresentato uno dei profili indagati (A3\_L5) sia nel dominio delle elevazioni e sia nel dominio delle accelerazioni; è evidente che nel secondo caso si riesce a percepire, anche solo visivamente, la presenza di singolarità transienti accentuate nel profilo delle accelerazioni, ma poco riconoscibili nella rappresentazione delle elevazioni.

Successivamente, è stato implementato l'algoritmo della Teoria del MS in un codice di calcolo, al fine di ricercare i transienti su ciascun profilo in esame; in sequenza, l'algoritmo computa il MS; individua il massimo locale di MS che ricade nella finestra mobile di osservazione; ricerca i *drop point*, computa il RMSVA e valuta il CF qualora i *drop point* (10%  $MS_{max\ locale}$ ) esistono nell'intorno del massimo e ricadono nella finestra mobile (2.50 m), adottando le espressioni riportate nel paragrafo 4.2.2 e secondo i criteri di definizione dei transienti, assumendo:

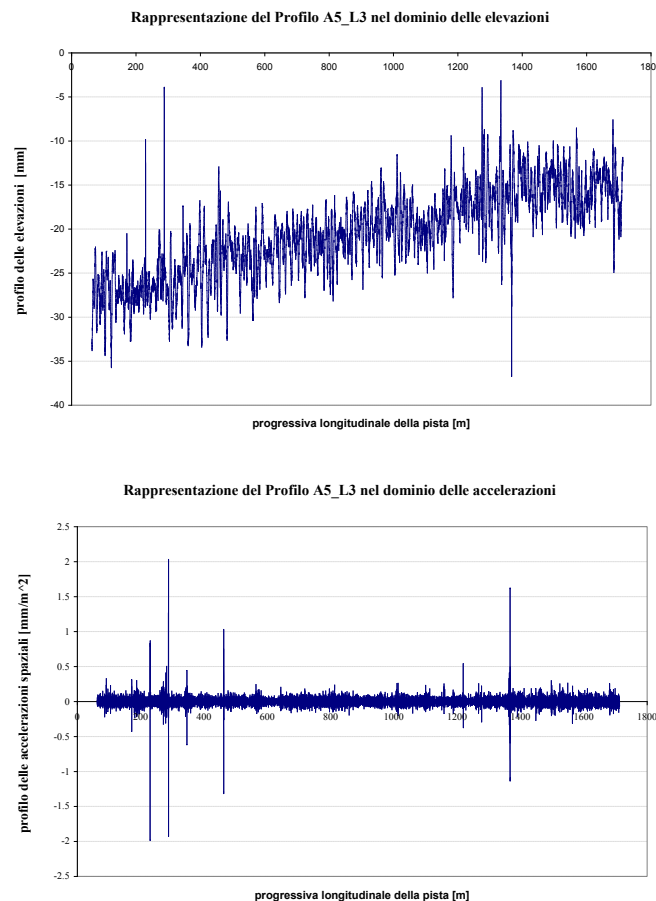
1. una lunghezza base di 0.50 m per il computo del MS;
2. una lunghezza base di 3.50 m, per il computo del RMSVA.

Per quanto riguarda la ricerca dei transienti per mezzo dell'analisi Wavelet, questa è stata eseguita con l'ausilio del programma *Matlab Wavelet Toolbox*, adottando come wavelet madre la Daubechies di ordine 3 (*db3*).

Le ragioni per aver scelto la *db3* in questo studio sono le seguenti:

- 1) la *db3* è semplice e di adeguata risoluzione in entrambi i domini, spaziali e di frequenza;

- 2) essa si presta per la decomposizione iterativa impiegata nella trasformata discreta wavelet;
- 3) è stata spesso impiegata in applicazioni di analisi wavelet dei profili delle pavimentazioni, come documentato in letteratura (Liu Wie et al., 2005)(A.T.Papagiannakis et al.,2007)( Liu Wie et al., 2005).



**Figura 5. 3** Rappresentazione del profilo A3\_L5 nel dominio delle elevazioni (in alto) e delle accelerazioni (in basso).

Scelta la wavelet madre, è stata eseguita la decomposizione in sotto-bande di frequenza dei profili indagati; essa ha fornito, per ciascuno di essi, una serie di sotto-profilo, e a ciascuno di questi ultimi corrisponde un range di lunghezze d'onda, e quindi di frequenze.

A tal proposito è necessario fare alcune precisazioni in merito al numero di sotto-profilo in cui è scomposto il profilo e soprattutto il range di frequenza corrispondente a ciascuno di essi.

Per ciò che riguarda la numerosità dei sotto-profilo ( $n^{\circ}$ livelli), e assunta comunque sempre tale che:  $2^{n^{\circ} \text{livelli}} < \text{numero di punti del profilo}$ ; il Toolbox Wavelet Matlab, fissa un  $n^{\circ}$ livelli di decomposizione in funzione della wavelet madre impiegata e del numero di punti in cui è stato campionato il profilo.

Non essendoci una regola comune, sulla base degli studi presenti in letteratura, si apprende che per descrivere i profili di regolarità, attraverso la DWT (Discrete Wavelet Transform), sono sufficienti i primi 5 o 6 livelli di decomposizione.

Definiti quindi il numero di livelli e il passo di campionamento,  $\Delta L$ , può essere definito il range di lunghezze d'onda, e quindi di bande di frequenze, associate a ciascun sottoprofilo, secondo la logica seguente (Wei, Fwa, M ASCE, Zhao Zhe, 2005) (Brown, et alii, 2010):

- ☞ si calcola la minima lunghezza d'onda rilevata, pari a due volte il passo di campionamento, cioè  $\lambda_{\min} = 2 * \Delta L$ ;
- ☞ al primo livello,  $d_1$ , l'analisi wavelet decomporrà il profilo in un range di *basse lunghezze d'onda*,  $\lambda_{\min} - 2\lambda_{\min}$  m, cui corrisponde il range delle frequenze più alte contenute nel profilo, pari a  $1/\lambda_{\min} - 1/2\lambda_{\min}$  cicli/m, e un range di *alte lunghezze d'onda*, cui corrisponde il range delle frequenze più basse;
- ☞ al successivo livello di decomposizione,  $d_2$ , l'analisi suddividerà la banda delle basse frequenze del primo livello, in ulteriori due bande di lunghezze d'onda (e quindi frequenze): *basse*,  $2\lambda_{\min} - 4\lambda_{\min}$  m, ed *alte*, a cui corrisponderanno altrettanti range di frequenze, rispettivamente alte e basse;
- ☞ si procede allo stesso modo, fino a raggiungere l'ultimo livello di decomposizione fissato.

Alla luce di tali considerazioni, sono state tracciate tre possibili strategie di analisi dei profili:

- ◆ Caso 0. Si applica l'algoritmo del MS per la ricerca dei transienti sui profili delle accelerazioni verticali; si rimuovono le singolarità individuate con il filtro “*cutoff frequency*”; si segmenta il profilo filtrato con il metodo dicotomico; si verifica la stazionarietà con i due test di bontà Chi-Q e K-S.
- ◆ Caso 1. Si applica la decomposizione wavelet, con *db3*; nei primi 4 sottoprofilo ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ ) in cui è stato suddiviso il profilo di partenza, si ricercano i transienti mediante l'algoritmo del MS; questi sono rimossi sul profilo d'ingresso per mezzo del filtro *cutoff frequency*; si individuano le tratte omogenee con il dicotomico e infine se ne verifica la stazionarietà di ciascuna di esse con i test Chi-Q e K-S.
- ◆ Caso 2. Si applica la decomposizione wavelet, con *db3*; nei primi 4 sottoprofilo ottenuti ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ ) si ricercano i transienti mediante l'algoritmo del MS; questa volta essi saranno rimossi dal sottoprofilo su cui sono stati individuati, e non dal profilo di partenza; si ricostruisce il profilo, sommando sostanzialmente tutti i sottoprofilo della decomposizione, tra cui i primi 4 che verranno preventivamente depurati dei transienti per mezzo del filtro *cutoff*

frequency; si individuano le tratte omogenee con il dicotomico e infine se verifica la stazionarietà con i test Chi-Q e K-S.

Per il Caso 2 e 3, i transienti sono stati quindi individuati nei primi 4 sottoprofili; essendo il passo di campionamento pari a 0.10 m, vuol dire che la ricerca delle irregolarità è stata eseguita nelle sotto-bande di frequenza e di lunghezze d'onda riportate in (

Tabella 5. 3), associabili a ciascun livello di decomposizione:

LIVELLO DI DECOMPOSIZIONE	RANGE DI LUNGHEZZE D'ONDA [m]	RANGE DI FREQUENZE [cicli/m]
$d_1$	0.20 – 0.40	5.00 – 2.50
$d_2$	0.40 – 0.80	2.50 – 1.25
$d_3$	0.80 – 1.60	1.25 – 0.625
$d_4$	1.60 – 3.20	0.625 – 0.312

**Tabella 5. 3** Range di frequenza e lunghezze d'onda associati ai livelli di decomposizione.

### 5.3.2 RISULTATI METODOLOGIE A CONFRONTO: PARTE 1

I risultati ottenuti, a fronte della prima fase di analisi preliminare, applicando le tre strategie di analisi ai 12 profili campione, sono riportati in Tabella 5. 4, in termini di percentuale di tratte stazionarie, ricavata, per ciascun profilo, come rapporto della somma delle lunghezze delle tratte risultate stazionarie dai test per la lunghezza totale del profilo stesso.

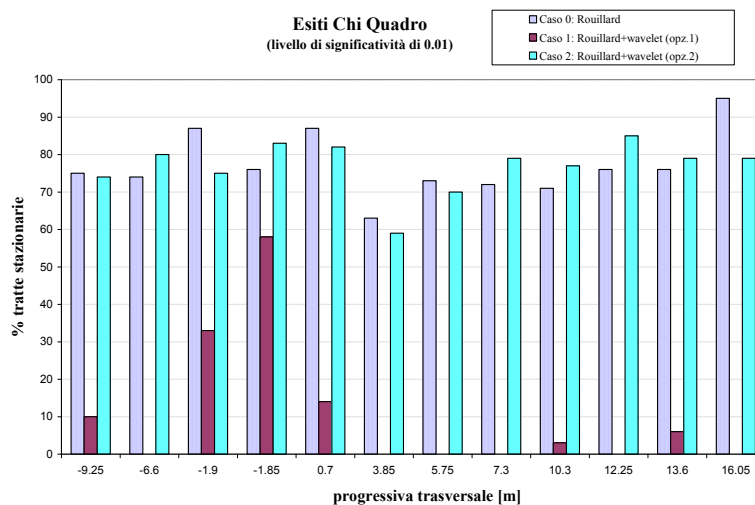
Profili indagati			% TRATTE risultate essere STAZIONARIE											
			Esiti Chi-Quadro						Esiti Kolmogorov-Smirnov					
			$\alpha=0.01$			$\alpha=0.05$			$\alpha=0.01$			$\alpha=0.05$		
ID allineame	ID profilo	progr trasv [m]	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 0	Caso 1	Caso 2	Caso 0	Caso 1	Caso 2
A12	L5	-9.25	75	10	74	50	3	62	93	25	90	80	15	86
A13	L3	-6.6	74	0	80	62	0	65	90	3	88	86	0	85
A11	L4	-1.9	87	33	75	69	21	58	87	56	92	84	41	89
A10	L1	-1.85	76	58	83	59	43	76	95	70	98	95	63	95
A1	L2	0.7	87	14	82	84	5	71	95	19	89	89	16	89
A3	L5	3.85	63	0	59	54	0	54	76	0	83	71	0	68
A2	L6	5.75	73	0	70	59	0	65	88	0	86	80	0	86
A4	L4	7.3	72	0	79	67	0	63	82	0	89	82	0	89
A5	L3	10.3	71	3	77	58	0	72	87	5	92	84	5	87
A6	L6	12.25	76	0	85	68	0	70	83	0	80	76	0	80
A7	L2	13.6	76	6	79	74	3	68	95	12	95	82	6	89
A8	L1	16.05	95	0	79	76	0	68	100	0	100	98	0	100

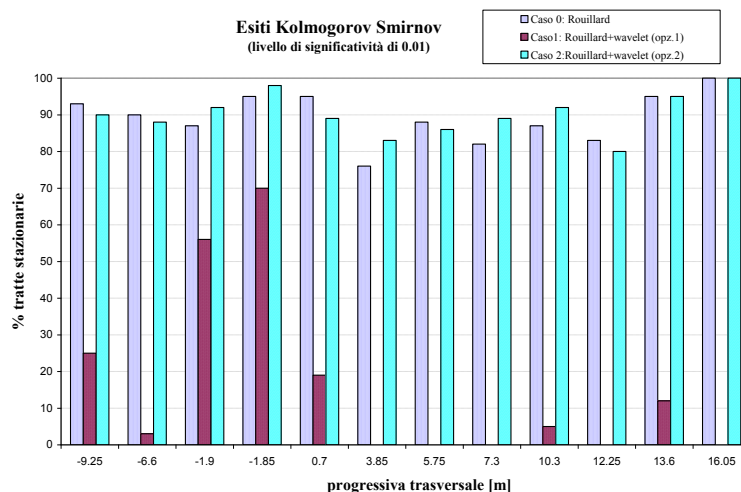
**Tabella 5. 4** Esiti dei test di stazionarietà, per le 3 strategie di analisi proposte (Caso 0, Caso1, Caso2).

Da una prima valutazione dei risultati ottenuti, è stato possibile osservare che :

- ✓ In assoluto, tra le tre strategie, quella che fornisce i risultati peggiori è Caso1; in oltre metà dei casi infatti non si è riscontrata per essa nessuna tratta stazionaria;
- ✓ Il 100% di tratte stazionarie, secondo il test Chi-Q non si raggiunge in nessuno dei 12 profili; solo per il profilo A8\_L1 secondo il test K-S;
- ✓ A parità di test statistico, mediamente, le percentuali maggiori si verificano per la strategia Caso 0, se  $\alpha = 0.01$ , e la strategia Caso 2, se  $\alpha = 0.05$ , secondo il Chi-Q; ragionando analogamente per K-S, si ha una situazione inversa, ovvero, se  $\alpha = 0.01$ , fornisce i risultati migliori il Caso 2, se  $\alpha = 0.05$ , allora le % maggiori si hanno nel Caso0.

In Figura 5. 4 si riporta una rappresentazione grafica dei risultati ottenuti dai due test, per il caso di  $\alpha = 0.05$ , e relativi alle tre strategie di analisi proposte.





**Figura 5. 4** Confronto esiti dei test Chi-Q (in alto) e K-S (in basso), a parità di livello di significatività (0.01) per le tre strategie di analisi ipotizzate (Caso 0, Caso1, Caso2).

A conclusione della Parte 1 dell’analisi, si può affermare che Caso 1 è da escludere tra le strategie possibili perché non fornisce risultati adeguati; per Caso 0 e Caso 2, i primi risultati non sono ritenuti sufficienti da poter affermare che l’una sia migliore dell’altra, ma nemmeno che l’una possa escludere l’altra.

I risultati fin qui raggiunti sono stati in parte oggetto della pubblicazione “*Modelling Roughness progression by measurements of runway surface profiles*”, presentata in occasione del VI Congresso Internazionale della Manutenzione e Riabilitazione delle Pavimentazioni e Controlli Tecnologici, tenutosi presso il Politecnico di Torino (2009).

La strategia Caso 0 illustrata nella Parte 1, è stata applicata su 48 dei 72 profili della pista di Ciampino, al fine di caratterizzarne la regolarità, e pervenire ad un modello di regressione della regolarità in funzione dei ricoprimenti.

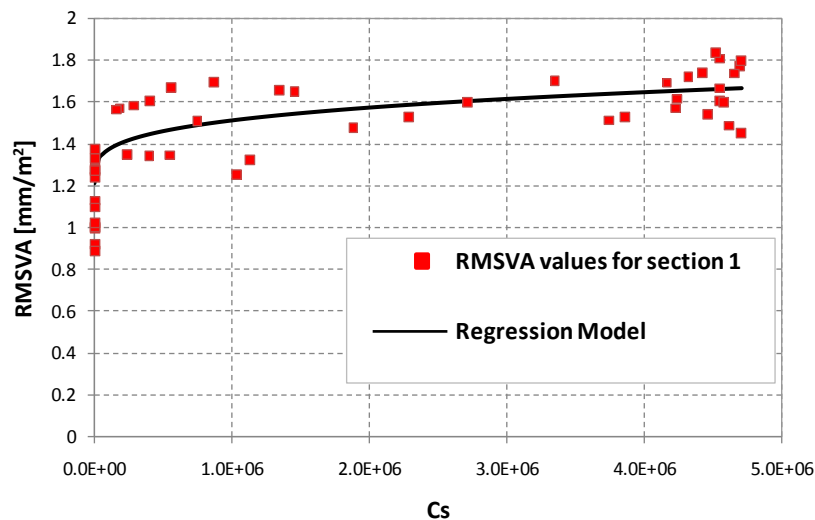
In accordo alle procedure riportate in (Transport Canada,2005), è stato scelto il RMSVA come indice descrittore, valutato per lunghezza base di 20 m e sul quale è stata basata la procedura di identificazione delle tratte omogenee per l’allineamento più carico; il risultato del sezionamento dicotomico ha fornito una suddivisione della pista in quattro zone.

Per ciascuna di esse, valutato il numero di ricoprimenti secondo il modello ECs, è stato trovato che il seguente modello di regressione sembra si adatti abbastanza bene ai dati sperimentali [21]:

$$[21] \quad RMSVA = a + b \cdot Cs^c$$

Dove, per ciascuna zona omogenea:  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono i parametri di regressione da valutare;  $Cs$  è in numero di ricoprimenti e RMSVA rappresenta il valore irregolarità stimata.

Nella Figura 5. 5 si riportano il modello di regressione esprimendo l'RMSVA in funzione dei ricoprimenti per la zona 1 (Figura 5. 5):



**Figura 5. 5** Valori sperimentali e modello di regressione per la zona1. (D'Apuzzo et al.,2008)

### **5.3.3 METODOLOGIE A CONFRONTO: PARTE 2**

Si è passati quindi alla fase successiva dell'analisi preliminare (Parte 2): assumendo che il metodo di sezionamento dicotomico resti valido per i nostri scopi, si è messo in discussione la tecnica di rimozione dei transienti impiegata.

In questa seconda parte di analisi preliminare, si è prestata attenzione alle tecniche di rimozione dei transienti; questi ultimi, già individuati e selezionati durante la Parte 1 dell'analisi, sono stati rimossi in questo caso mediante il filtro K2, già introdotto nel paragrafo 4.3.5. In merito alla rimozione dei transienti, il presupposto da cui si è partiti è quello di eliminare “lo stretto necessario”, al fine di preservare il più possibile, il contenuto spettrale del profilo originale.

Allo stesso modo si è ragionato nei confronti di ciò che “vado a rimpiazzare” in sostituzione al transiente; anche in tal caso il principio è di andare a sostituire un qualcosa che non si discosti tanto da quello che sta nell'intorno dell'area interessata, in modo da evitare di “creare” ulteriori punti di discontinuità, che invaliderebbero anche la successiva segmentazione in tratte omogenee del profilo depurato.

Coerentemente alla prima osservazione, è stata apportata una modifica all'algoritmo di Rouillard per ciò che concerne la definizione dell'effettiva estensione del transiente rispetto a quella fissata dalla stessa teoria.



L'idea di progettare un "filtro ad hoc" è scaturita invece a seguito dalle suddette osservazioni; si è andati ad analizzare nel dettaglio quale fosse effettivamente il risultato finale, a seguito della rimozione e sostituzione del transiente secondo la teoria del filtro cutoff, illustrato nel paragrafo 4.3.4.

Si riporta in Figura 5. 6 un transiente tipo: l'algoritmo di Rouillard considera *transiente* tutto il tratto, da A a B (in blu). Secondo la correzione suggerita, è da considerarsi transiente il tratto A\* - B\* (in verde); in pratica l'algoritmo "corretto" traccia virtualmente una retta passante per i punti A e B, secondo la seguente espressione (Teorema di Talete) [22]:

$$[22] \quad y(x) = y_B - \frac{x_B - x}{x_B - x_A} \cdot (y_B - y_A)$$

individua il punto in cui la profondità è massima (massimo scostamento del profilo dalla retta) e rispetto ad esso, muovendosi a sinistra e a destra, fissa rispettivamente in A\* e B\* i nuovi estremi del transiente, in quanto subito prossimi al punto d'intersezione della retta con il profilo.

Andando ad analizzare invece gli effetti del filtraggio delle due tecniche prese in esame, su un generico transiente, si osserva come nel caso di filtro a cutoff frequency, l'output si discosta molto da quello che era il profilo originale, mentre nel caso del filtro K2, il transiente corretto sembra adattarsi meglio a quello che era la configurazione iniziale; seppur addolciti, la numerosità e posizione dei picchi si conserva anche dopo la rimozione.

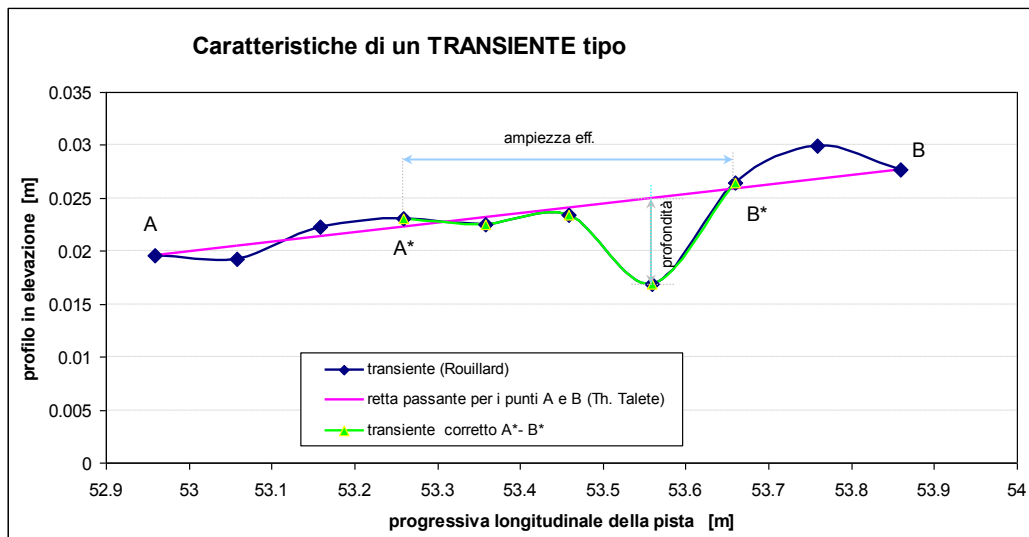
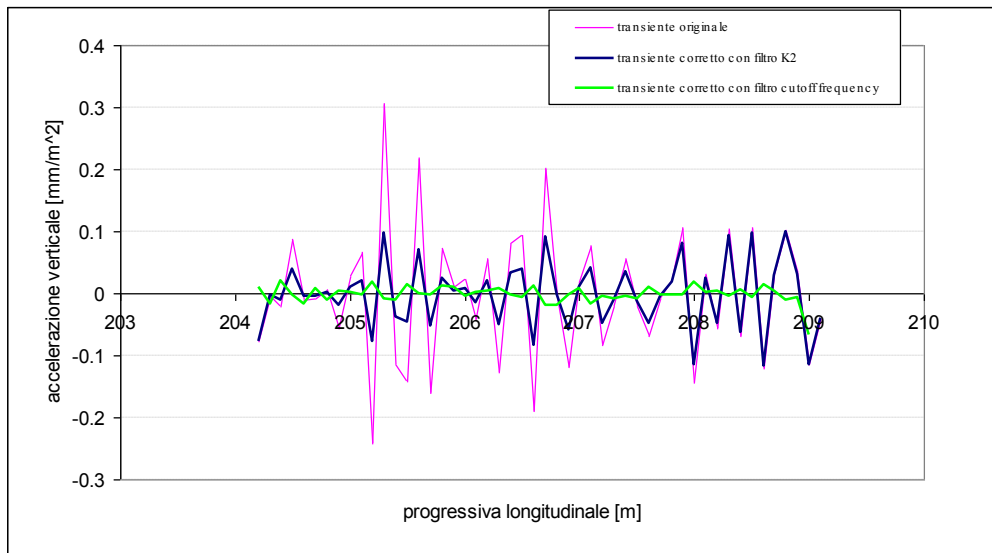


Figura 5. 6 Correzione del transiente: ampiezza effettiva.



**Figura 5. 7** Tecniche di filtraggio a confronto, per un transiente tipo.

A valle di tali correzioni e osservazioni, sono state formulate due nuove strategie di analisi dei profili:

- ♦ Caso 0\*. Si applica l'algoritmo del MS per la ricerca dei transienti sui profili delle accelerazioni verticali; si rimuovono le singolarità individuate con il filtro K2; si segmenta il profilo filtrato con il metodo dicotomico; si verifica la stazionarietà con il test di bontà Chi-Q e K-S.
- ♦ Caso 2\*. Si applica la decomposizione wavelet, con db3; nei primi 4 sottoprofilo ottenuti (d1, d2, d3, d4) si ricercano i transienti mediante l'algoritmo del MS; essi saranno rimossi dal sottoprofilo per mezzo del filtro K2; si individuano le tratte omogenee con il dicotomico e infine si verifica la stazionarietà con i test Chi-Q e K-S.

### **5.3.4 RISULTATI METODOLOGIE A CONFRONTO: PARTE 2**

I risultati di questo secondo approccio di analisi, evidenziano sicuramente un miglioramento generale, poiché si osservano % di tratte stazionarie maggiori rispetto a quelle ottenute nella Parte 1 dell'analisi. Il test K-S dà sempre delle % superiori e questo in parte potrebbe essere dovuto alle condizioni meno severe che lo caratterizzano rispetto al Chi-Q.

La strategia Caso 0\*, globalmente sembra fornire una % maggiore rispetto a Caso2\*; facendo un confronto tra i risultati ottenuti nella prima fase di elaborazioni e i risultati in esame, può essere considerata come possibile tecnica efficace di ricerca dei transienti.

Inoltre bisogna dire che nel Caso 2\*, essendo i transienti individuati sui primi 4 sottoprofilo di decomposizione, quasi sempre si parla di una numerosità di questi ultimi di un ordine di grandezza

superiore, a quelli che invece si ottengono nel Caso0\*. Rimuovere tanti transienti, vuol dire “intervenire” su una lunghezza di profilo molto ampia; in tal modo viene meno una delle condizioni basilari della strategia ottimale definita all’inizio della discussione.

Profili indagati			% TRATTE risultate essere STAZIONARIE							
			Esiti Chi-Quadro				Esiti Kolmogorov-Smirnov			
			$\alpha=0.01$		$\alpha=0.05$		$\alpha=0.01$		$\alpha=0.05$	
ID allineamento	ID profilo	progr trasv [m]	Caso 0*	Caso 2*	Caso 0*	Caso 2*	Caso 0*	Caso 2*	Caso 0*	Caso 2*
A12	L5	-9.25	80	82	67	56	95	94	95	83
A13	L3	-6.6	84	75	74	64	94	94	94	94
A11	L4	-1.9	96	89	86	79	100	95	100	95
A10	L1	-1.85	73	81	67	70	100	100	97	100
A1	L2	0.7	85	86	79	73	100	96	95	96
A3	L5	3.85	83	65	68	56	96	82	96	80
A2	L6	5.75	72	81	57	60	100	95	99	92
A4	L4	7.3	76	75	66	69	91	84	91	84
A5	L3	10.3	82	71	71	63	92	92	86	86
A6	L6	12.25	69	76	63	69	80	86	78	80
A7	L2	13.6	84	81	72	75	92	92	83	90
A8	L1	16.05	91	85	81	73	100	94	97	94

**Tabella 5. 5** Esiti dei test di stazionarietà, per le 2 strategie di analisi proposte (Caso 0\*,Caso2\*).

### 5.3.4.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO SEMPLIFICATO DI CALCOLO DEI RICOPRIMENTI: *NCeq*

Il modello di calcolo proposto, il cui sviluppo matematico è stato introdotto nel paragrafo 3.3.1.3, fornisce il numero *NCeq* (ovvero numero di ricoprimenti equivalenti) come somma di tre gaussiane, moltiplicate da opportuni coefficienti amplificativi, che tengono conto di tutte le caratteristiche legate alla tipologia degli aeromobili direttamente correlabili al danno della pavimentazione. Dal punto di vista pratico, per un’assegnata pista, è necessario definire lo spettro di traffico aereo dell’aeroporto e individuare in esso il velivolo di riferimento, ossia l’aereo più pesante e a pieno carico che maggiormente sollecita la sovrastruttura della pista.

Nel caso specifico di Ciampino, dall’analisi del volume di traffico che ha interessato l’aeroporto negli ultimi 15 anni circa, è emerso che l’aeromobile ascrivibile come aereo critico è il Boeing 737-800 e rispetto ad esso è stato omogeneizzato il danno derivante da tutti gli altri aeromobili. È stato osservato che il modello proposto per il calcolo dei ricoprimenti equivalenti si presta abbastanza come valido strumento alternativo al modello teorico proposto da Festa et al. (2008), per il calcolo dei ricoprimenti *NCeq*, con scarti assoluti compresi tra il 2 e 7 %, in base all’esponente considerato (Tabella 5. 6); al variare del criterio di omogeneizzazione, varia la forma della curva, in termini di distanza tra i picchi.

BOEING 737-800 (aereo di riferimento)	ECs			Nceq			scarto= ass[(ECs-Nceq)/ECs]		
	esp = 0	esp = 2	esp = 4	esp = 0	esp = 2	esp = 4	esp = 0	esp = 2	esp = 4
x [m] da asse pista									
-10	3011.01	8243.05	32508.5	3408.61	10419.87	40859.7	0.132049	0.264079	0.256893
-9	18990.2	45946	174052	19624.38	51909.18	194994.5	0.033395	0.129787	0.120323
-8	90088.6	184988	655977	88622.66	193205.2	675621.3	0.016272	0.04442	0.029947
-7	326528	550541	1758050	316570.9	549534.1	1713561	0.030494	0.001829	0.025306
-6	908698	1243290	3400070	887173.8	1223134	3224623	0.023687	0.016212	0.051601
-5	1933250	2176080	4844190	1915537	2158710	4589998	0.009162	0.007982	0.052473
-4	3133660	2971250	5217640	3144822	3002327	5049597	0.003562	0.010459	0.032207
-3	3929340	3137630	4359160	3964698	3226423	4362171	0.008999	0.028299	0.000691
-2	4037380	2546540	2884740	4056893	2654492	2987209	0.004833	0.042391	0.035521
-1	3796640	1694550	1614970	3774415	1792811	1725571	0.005854	0.057986	0.068485
0	3664480	1302770	1126700	3620663	1394354	1227852	0.011957	0.0703	0.089777
1	3796640	1694550	1614970	3774415	1792811	1725571	0.005854	0.057986	0.068485
2	4037380	2546540	2884740	4056893	2654492	2987209	0.004833	0.042391	0.035521
3	3929340	3137630	4359160	3964698	3226423	4362171	0.008999	0.028299	0.000691
4	3133660	2971250	5217640	3144822	3002327	5049597	0.003562	0.010459	0.032207
5	1933250	2176080	4844190	1915537	2158710	4589998	0.009162	0.007982	0.052473
6	908698	1243290	3400070	887173.8	1223134	3224623	0.023687	0.016212	0.051601
7	326528	550541	1758050	316570.9	549534.1	1713561	0.030494	0.001829	0.025306
8	90088.6	184988	655977	88622.66	193205.2	675621.3	0.016272	0.04442	0.029947
9	18990.2	45946	174052	19624.38	51909.18	194994.5	0.033395	0.129787	0.120323
10	3011.01	8243.05	32508.5	3408.61	10419.87	40859.7	0.132049	0.264079	0.256893
% scarto medio=							2.612241	6.081868	6.841287

**Tabella 5. 6** Valori degli scarti assoluti tra i valori forniti dai due modelli ECs e Nceq.

In Figura 5. 8 si riportano le curve dei ricoprimenti ottenuti dall'implementazione dei due modelli di calcolo al variare del criterio di omogeneizzazione.

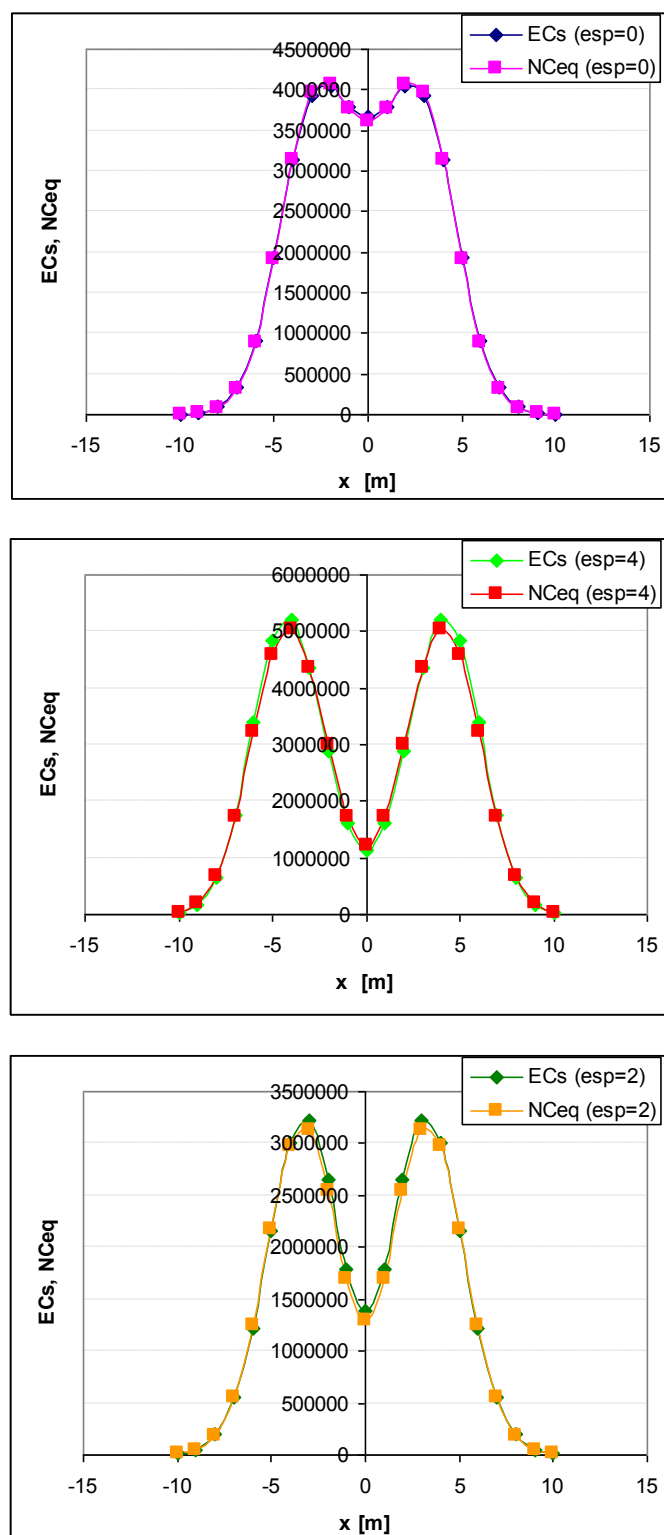


Figura 5. 8 Curve dei ricoprimenti al variare dell'esponente: confronto ECs vs NCeq

### **5.3.4.2 STUDI ULTERIORI SUL MODELLO REGRESSIVO: *RMSVA* vs *ECs***

#### **Ipotesi di nuovi modelli regressivi**

L'irregolarità di una pista aeroportuale incrementa con l'incremento del numero di ricoprimenti. In particolare si passa da un valore iniziale di *RMSVA*, che si osserva nelle pavimentazioni nuove, e a un valore massimo sopra il quale è necessario intraprendere azioni correttive di ripristino della regolarità della pista. Nel presente lavoro è stato scelto l'*RSMVA* come indice sintetico di caratterizzazione dell'irregolarità diffusa, valutato su lunghezza base di 20 m; si è osservato come i livelli massimi di *RMSVA* sono raggiunti lungo le più frequenti traiettorie degli aeromobili in fase di atterraggio; è stato computato un "valore medio" di *RMSVA*, considerando i profili dell'allineamento più carichi ( 6 profili ricadenti in una fascia di 3,00 a destra e sinistra dell'asse pista), e su di esso è stato possibile effettuare una segmentazione della pista in 4 zone principali, caratterizzate da differenti livelli di regolarità.

Tale suddivisione è coerente con le differenti sollecitazioni cui la pavimentazione è soggetta durante le quattro operazioni di atterraggio di un aeromobile, che si distinguono in: toccata con la pista, inversione di spinta (freni aerodinamici), frenatura con ruote, rullaggio verso le uscite; è certo che per ciascuna delle fasi suddette la pavimentazione è sottoposta a sollecitazioni di differente natura e quindi sottoposta a danni differenziali.

Come detto in precedenza, il modello di regressione che sembra rappresentare abbastanza bene il fenomeno del degrado della regolarità e che, allo stesso tempo, tiene conto degli effetti derivanti dall'interazione aeromobile-pavimentazione ha la seguente forma:

$$I. \text{RMSVA}_{(\text{stimato})} = 1.2 + \text{pr1} * (\text{Neq}^{\text{pr2}})$$

dove 1.2 mm/m<sup>2</sup> è il valore iniziale *RMSVA* per nuove pavimentazioni; pr1 e pr2 sono i parametri di regressione da valutare; *ECs* è il numero di ricoprimenti equivalenti.

Analizzando attentamente la Prob(t) associata a ciascuno dei parametri di regressione del modello adottato, indipendentemente dalla numerosità considerata, è emerso che essa si mantiene su valori abbastanza elevati per quel che riguarda il parametro pr1, mentre risulta mediamente nulla per il parametro pr2. Alla luce di tali osservazioni, sono stati testati altre forme, per i 72 profili acquisiti:

2.  $RMSVA = pr_0 + (Neq^{pr^2})$
3.  $RMSVA = pr_0 + pr_1 \cdot (Neq^{pr^2})$
4.  $RMSVA = pr_0 + pr_1 \cdot \ln(Neq + pr_2)$
5.  $RMSVA = pr_1 + (Neq \cdot pr_2)$

Si osserva (Tabella 5. 7) come, tra i modelli analizzati, quello lineare sembra comportarsi meglio degli altri in quanto l'unico ad essere caratterizzato da valori di probabilità di rigetto dei parametri di regressione nulla, ma fornisce allo stesso tempo dei valori di  $R^2$  inferiori rispetto a quelli forniti dal modello 1. soprattutto per le zone 1 e 4. In un certo senso i risultati sopra riportati, inducono a mettere in discussione il modello inizialmente proposto; sarebbe opportuno quindi intraprendere iniziative di perfezionamento dello stesso, volte all'individuazione del modello ottimale di regressione.

		Prob(t) pr0	Prob(t) pr1	Prob(t) pr2	R^2	SSR	R Pearson
RMSVA = 1.2+pr1*(Neq^pr2)	ZONA 1	1.2	0.40659	0.00001	0.6613865	1.755987	0.81399133
	ZONA 2	1.2	0.60849	0	0.8637216	3.59654	0.94228789
	ZONA 3	1.2	0.69448	0	0.7767537	1.896244	0.8908155
	ZONA 4	1.2	0.03605	0	0.5850744	1.741017	0.76526964
RMSVA = pr0+(Neq^pr2)	ZONA 1	0.00106	-	0	0.6691242	1.715806	0.81800171
	ZONA 2	0.00048	-	0	0.628855	9.796652	0.79324421
	ZONA 3	0.00144	-	0	0.6384054	3.070605	0.79906467
	ZONA 4	0.7497	-	0	0.5931789	1.707035	0.77018542
RMSVA = pr0+pr1*(Neq^pr2)	ZONA 1	0.00361	0.52132	0.10713	0.6726552	1.697509	0.82015412
	ZONA 2	0	0.67232	0	0.8912101	2.870981	0.94404967
	ZONA 3	0	0.76424	0.00002	0.7972064	1.722601	0.89282292
	ZONA 4	0.37754	0.63065	0.37835	0.594256	1.702508	0.77088489
RMSVA = pr0+pr1*ln(Neq+pr2)	ZONA 1	0.77732	0.75047	0.78195	0.6329853	1.90329	0.7956004
	ZONA 2	0.7555	0.73845	0.75473	0.889273	2.922267	0.9430202
	ZONA 3	0.85421	0.84335	0.85184	0.795584	1.736342	0.89191652
	ZONA 4	0	0	0.78717	0.5904791	1.718368	0.76842938
RMSVA = pr0+(Neq*pr2)	ZONA 1	0	-	0	0.6270243	8.161049	0.81497375
	ZONA 2	0	-	0	0.8900635	47.89293	0.75460732
	ZONA 3	0	-	0	0.7968426	14.68287	0.78041786
	ZONA 4	0	-	0	0.494896	6.096361	0.7679186

**Tabella 5. 7** Risultati delle Prob(t) dei parametri regressivi  
[Dati elaborati con l'impiego del software Datafit]

### Numerosità ottimale dei profili di regolarità

Al fine ridurre la mole di dati necessari per ottenere un modello empirico di degrado attendibile, si è ritenuto opportuno indagare sulla numerosità ottimale di misure di profili necessari a fornire adeguate informazioni sul grado di regolarità di una pista aeroportuale, andando, di fatto, ad analizzare in modo più approfondito i parametri statistici risultanti dalle diverse regressioni proposte.

In particolare, riducendo progressivamente il numero di profili di regolarità a partire dalla numerosità massima disponibile (72) sono stati calcolati, per ognuna delle quattro zone in cui è stata suddivisa la pista, i seguenti parametri:

1. SSR (Residual Sum of Squares);
2. R Pearson, calcolato tra la grandezza misurata (regolarità) e quella stimata dallo specifico modello di regressione;
3. Prob(t), probabilità di rigetto di ciascun parametro di regressione;
4.  $R^2$ , coefficiente di determinazione.

dove, i primi due, sono stati calcolati sulla totalità dei punti sperimentali ma utilizzando il modello regressivo calibrato sulla popolazione via via decrescente.

I risultati attesi sono i seguenti:

- a) La somma degli scarti quadratici (SSR) diminuisca all'aumentare della numerosità;
- b) Il coefficiente di Pearson diminuisca al diminuire del numero dei profili considerati;
- c) La probabilità Prob(t)<sup>1</sup> tenda a 0 per ciascun parametro regressivo, prescindendo dalla numerosità del profilo;
- d) Il coefficiente di determinazione  $R^2$  tenda all'unità.

Nella Tabella 4. 1 sono riportate le ipotesi di numerosità analizzate: nella prima colonna, sono riportate tutte le varie ipotesi di numerosità possibile, partendo dalla numerosità max disponibile ovvero 72, ricavate con una procedura di riduzione finalizzata ad analizzare, di volta in volta, una densità di informazioni in direzione longitudinale della pista via via decrescente. Nella seconda colonna, fatto salva la condizione di numerosità max, è riportato il numero delle combinazioni analizzate, più o meno equispaziate; ad es. dai 72 valori iniziali, sono state estrapolate 4 diverse combinazioni (considerando 1 profilo ogni 4, una volta partendo dal 1° del set, una volta dal 2°, e così via) ciascuna di 18 valori, e quindi sono stati ottenuti 4 diversi valori di SSR e R Pearson, di cui è stato computato il valore medio corrispondente.



n° profili	n° combinazioni analizzate											
	REGOLARITA'											
72	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	1	2	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-
12	1	2	3	4	5	6	-	-	-	-	-	-
9	1	2	3	4	5	6	7	8	-	-	-	-
8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-	-	-
6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

**Tabella 4. 1** Combinazioni di numerosità dei profili analizzate

I valori dei coefficienti SSR e R Pearson sono stati ricavati in termini sia assoluti che relativi; in quest'ultima ipotesi sono state esaminate due possibilità, Opzione 1 e Opzione 2, come riportato nello schema seguente:

RELATIVO		ASSOLUTO
OPZIONE 1	$\frac{SSR(n_i) - SSR(n_{max})}{R\ Pears(n_i) - R\ Pears(n_{max})}$	$\frac{SSR(n_{max})}{R\ Pears(n_{max})}$
OPZIONE 2	$\frac{SSR(n_i) / SSR(n_{max})}{R\ Pears(n_i) / R\ Pears(n_{max})}$	

dove:

$n_i$  è la  $i$ -esima numerosità di profili analizzata, con  $i \in 0..n_{max}$   
 $n_{max}$  è la numerosità di profili massima disponibile.

Nei grafici seguenti (Figura 5. 9) si osserva come i valori di SSR osservati, sia in termini assoluti che relativi, subiscono un decremento repentino fino ad un numero di profili compreso tra 12 e 18, mentre per numerosità di profili superiori tale decremento si attenua, quasi annullandosi.

Per i valori di R Pearson non si replicano le osservazioni anzidette, soprattutto in termini assoluti; essi presentano una variabilità pressoché nulla al variare della numerosità, come dimostrano i grafici che seguono, per cui è lecito ritenere che l'R Pearson risulti un parametro poco rilevante nella selezione del numero ottimale di profili da indagare (Figura 5. 10).

In definitiva, in base ai risultati ottenuti, si propone un'acquisizione minima di 18 profili, al fine di caratterizzare sufficientemente la regolarità di una pista aeroportuale e da essi ricavare un modello di degrado valido, lungo allineamenti trasversali compresi in una fascia di ampiezza 3,00 m, sia a destra e sia a sinistra dell'asse della pista.

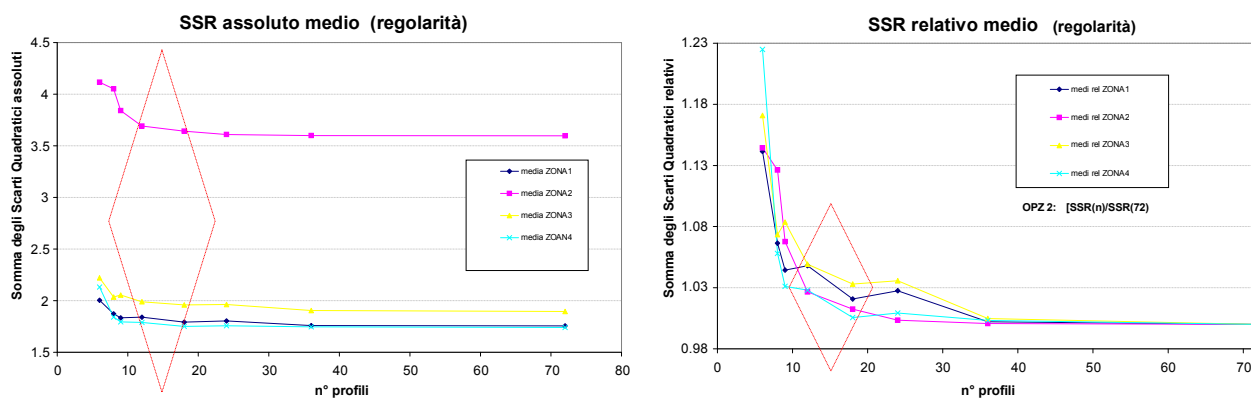


Figura 5.9 Andamenti di SSR al variare della numerosità dei profili

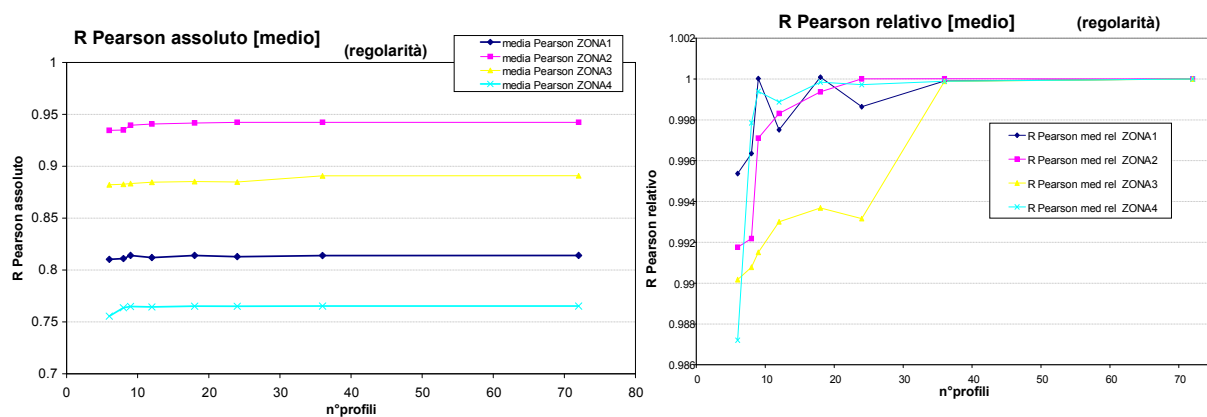


Figura 5.10 Andamenti di R Pearson al variare della numerosità dei profili

I risultati del presente lavoro di ricerca contribuiscono a fornire un nuovo approccio per l'analisi dei profili longitudinali delle pavimentazioni in ambito aeroportuale.

Un punto importante nello svolgimento della tesi è stato l'individuazione della metodologia ottimale volta alla caratterizzazione della regolarità, attraverso cui è possibile identificare le due componenti principali in cui può essere suddivisa l'irregolarità delle piste aeroportuali: singolarità (bumps) e irregolarità diffusa. La procedura prevede due fasi di analisi, la prima di localizzazione e rimozione delle singolarità puntuali e una seconda fase in cui il profilo depurato così ottenuto è analizzato allo scopo di valutare l'irregolarità diffusa (e.g. RMSVA).

Inoltre è stata proposta una nuova metodica per lo sviluppo di modelli di degrado della regolarità delle piste aeroportuali al fine di migliorare statisticamente la stima dei parametri regressivi e introdurre variabili indipendenti che catturano in modo esaustivo l'interazione aeromobile/pavimentazione. È stato introdotto quindi il numero di ricoprimenti equivalenti,  $N_{eq}$ , per rappresentare il danno indotto dallo spettro di traffico aereo; si ritiene opportuno fare un'analisi preliminare dei ricoprimenti allo scopo di valutare le traiettorie più frequenti lungo le quali si attingono i massimi valori di irregolarità.

In tal modo è possibile indirizzare e gestire in modo ottimale le operazioni di monitoraggio e soprattutto di misura dei profili. L'unione quindi delle informazioni riguardanti il traffico aereo con una esaustiva rappresentazione della irregolarità lungo lo sviluppo totale della pista, può rappresentare un valido strumento per lo sviluppo di modelli di degrado più efficienti, soprattutto all'inizio della vita utile di una pavimentazione di volo, oltre a fornire una più efficace descrizione della variabilità longitudinale e trasversale della regolarità. Si ritiene altresì importante far osservare che, applicando le varie metodologie proposte ad un caso studio (G.B.Pastine, Ciampino-Roma), si è pervenuti ad un modello di previsione che esula da quelle che sono le caratteristiche dei materiali degli strati che compongono la pavimentazione indagata, quindi è opportuno calibrare il degrado della regolarità su differenti piste aeroportuali per la specifica pavimentazione.

### **5.3.5 METODOLOGIE A CONFRONTO: PARTE 3**

In base a quanto osservato finora, in Parte 1 e 2 dell'analisi preliminare:

- ☞ Assunto che la strategia più adatta ai nostri scopi sia Caso 0\*;
- ☞ Assunto che la strategia indicata per la rimozione dei transienti sia il “filtro K2”;
- ☞ Assunto che il test Chi-Q sia più preferito al test K-S;

è stata intrapresa la Parte 3 dell'analisi, condotta su un campione ridotto di profili ed operando nel modo seguente:

- a) Di ciascun profilo sono noti i transienti, individuati secondo Rouillard, in Parte 1, e il rispettivo profilo depurato, secondo K2, in Parte 2;
- b) Inoltre si conosce il sezionamento dicotomico, finora sempre eseguito fissando il numero minimo di campioni per tratta, N, pari a 200; con passo di campionamento 10 cm, vuol dire che la tratta minima che il metodo individua non scende al di sotto di 20 m;
- c) Di queste tratte si verifica la stazionarietà con Chi Q;
- d) Tutte le tratte che, a seguito della verifica, risultano essere non stazionarie, sono sottoposte nuovamente a sezionamento dicotomico, per valori decrescenti N, in modo iterativo.

Studi precedenti hanno dimostrato che al diminuire di N, aumenta la % di tratte stazionarie, perché si riduce l'estensione della singola tratta ma allo stesso tempo, però, aumentano in numero. Posto che l'obiettivo fissato è il raggiungimento del 100 %, la seconda condizione che deve verificarsi ma in minor numero possibile.

Il valore minimo di N è stato fissato a 50, e comunque non deve essere al di sotto di 30, poiché in tal caso, avendo un intervallo di campionamento di 0.10 m, significherebbe andare ad indagare su tratte di 3.00 m, riconducibili a transienti.

Quindi i possibili valori che N può assumere sono: 200, 100 e 50.

		Modello: $RMSVA = 1.2 + pr1*(ECs^{pr2})$							
		Prob(t)							
n° profili	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4		
	pr1	pr2	pr1	pr2	pr1	pr2	pr1	pr2	
72	0.40659	0.00001	0.60849	0	0.69448	0	0.03605	0	
36	0.57934	0.00148	0.71678	0.00001	0.79108	0.00206	0.10619	7E-05	
36	0.54988	0.00258	0.72678	0.00003	0.77668	0.00037	0.19082	0.0002	
24	0.4819	0.00564	0.78023	0.00036	0.64337	0.00821	0.18313	0.0019	
24	0.65622	1.29E-02	0.768	0.00089	0.79677	0.00088	0.2999	0.0018	
24	0.78492	0.03007	0.77845	0.00045	0.83136	0.00324	0.25863	0.0021	
18	0.61041	0.0104	0.81754	0.0081	0.84677	0.03358	0.21572	0.0038	
18	0.77748	6.95E-02	0.77456	0.00086	0.82154	0.00697	0.39247	0.0115	
18	0.48159	0.01262	0.8353	0.01211	0.66022	0.01068	0.3527	0.0086	
18	0.75323	0.05438	0.76294	0.00054	0.86514	0.03858	0.32588	0.0109	
12	0.77636	0.10086	0.83991	0.02728	0.83081	0.13849	0.34288	0.0484	
12	0.91581	0.24968	0.85292	0.02055	0.87876	0.05861	0.42156	0.0444	
12	0.7429	0.07883	0.83905	0.02267	0.86371	0.02932	0.35298	0.0212	
12	0.52892	0.04997	0.83275	0.02077	0.68926	0.04513	0.41955	0.0312	
12	0.77573	0.07973	0.82702	0.01474	0.87752	0.05239	0.50343	0.0372	
12	0.78804	0.11501	0.84375	0.02657	0.85997	0.02207	0.62805	0.0594	
9	0.74793	0.05367	0.88154	0.11569	0.80761	0.08481	0.3469	0.023	
9	0.64404	0.07075	0.85137	0.0936	0.68003	0.07665	0.42082	0.0335	
9	0.81576	0.18759	0.88574	0.04411	0.95381	0.19414	0.61597	0.1074	
9	0.68597	0.11332	0.86674	0.05614	0.89046	0.13988	0.45452	0.1056	
9	0.6375	0.13415	0.8855	0.05892	0.82021	0.0322	0.63785	0.1601	
9	0.85533	0.23317	0.77844	0.00813	0.86461	0.08206	0.41277	0.0872	
9	0.79813	0.15048	0.87307	0.03082	0.85608	0.00439	0.67429	0.1114	
9	0.89165	0.32395	0.78688	0.01614	0.85422	0.12058	0.44757	0.0799	
8	0.37829	0.02549	0.84049	0.02174	0.77574	0.18825	0.66462	0.1545	
8	0.82719	0.20276	0.64145	1.19E-03	0.89345	0.04069	0.6353	0.1081	
8	0.84127	0.14639	0.82028	0.01885	0.85183	0.0442	0.76277	0.1973	
8	0.79665	0.17588	0.84327	0.02735	0.80141	0.03481	0.73665	0.1508	
8	0.90019	0.43057	0.9156	0.06918	0.76797	0.07005	0.45019	0.0799	
8	0.97561	0.61195	0.93133	0.38102	0.8948	0.19619	0.48212	0.1162	
8	0.78976	0.20709	0.8117	0.17325	0.94109	0.36554	0.37392	0.0586	
8	0.72054	0.10244	0.827	0.07432	0.84957	0.25564	0.32946	0.0887	
8	0.77561	0.15528	0.80645	0.00958	0.93725	0.21331	0.34107	0.0297	
6	0.5728	0.13885	0.93454	0.23129	0.68464	0.16522	0.58676	0.1763	
6	0.77637	0.308	0.94335	0.18487	0.84223	0.17812	0.69206	0.2291	
6	0.74833	0.24693	0.93599	0.28425	0.86554	0.21203	0.47998	0.1369	
6	0.6144	0.22129	0.93363	0.33302	0.94527	0.36468	0.52576	0.185	
6	0.70034	0.14155	0.83966	0.22105	0.92888	0.21154	0.40515	0.1339	
6	0.63114	0.13501	0.77802	0.20412	0.94197	0.19899	0.54488	0.1962	
6	0.95566	0.5073	0.82956	0.03275	0.95069	0.19282	0.54126	0.2845	
6	0.93974	0.21565	0.8366	0.03529	0.90478	0.04456	0.54864	0.213	
6	0.92055	0.22724	0.83444	0.05329	0.90012	0.05748	0.65661	0.1726	
6	0.74707	0.22198	0.80226	0.02577	0.68278	0.15687	0.76097	0.1616	
6	0.88208	0.28386	0.8174	0.01955	0.85767	0.14594	0.88354	0.0771	
6	0.89294	0.34425	0.79646	0.01697	0.80285	0.02802	0.87605	0.0825	

Tabella 5. 8 Valori di Pro(t) associato a pr1 e pr2, al variare della numerosità del campione

### 5.3.6 RISULTATI METODOLOGIE A CONFRONTO: PARTE 3

In

Tabella 5. 9 sono riportati i risultati ricavati dall'applicazione della strategia di analisi ultima ad un campione ridotto di profili, descritta per punti nel precedente paragrafo:

ID Allineamento	ID profilo	progr. trasv.[m]	n° transienti	n° tratte totali	n°tratte non stazionarie	L tratte non stazionarie [m]	% di L non stazionarie	% di L non stazionarie
A13	L3	-6.6	37	53	-	-	-	-
A10	L3	-1.1	40	64	4	22.6	1.3	0.077
A1	L1	0.25	41	54	1	4.9	0.3	0.017
A1	L5	1.65	30	50	-	-	-	-
A3	L3	3.2	64	56	-	-	-	-
A2	L1	4.25	61	70	-	-	-	-
A2	L5	5.65	36	54	2	6.7	0.4	0.023
A4	L3	7	34	56	2	8.5	0.5	0.029

**Tabella 5. 9** Risultati del Sezionamento Dicotomico iterato per N decrescente.

Dunque per il profili A13\_L3, A1\_L5, A3\_L3 e A2\_L1, in corrispondenza della colonna “n° tratte non stazionarie”, non si riporta alcun valore numerico; ciò vuol dire che applicando il sezionamento dicotomico iterato, per tutte le tratte che sono di volta in volta non stazionarie, si può raggiungere il 100% , ovvero la completa segmentazione del profilo A13\_L3 in tratte stazionarie.

A titolo di esempio, in Tabella 5. 10 si riportato i risultati parziali del sezionamento dicotomico iterato per il profilo A13\_L3. In pratica a seguito del primo sezionamento dicotomico, per N=200, e successiva verifica di stazionarietà, sono risultate non stazionarie le tratte: 2, 13, 21, 28 e 30; ciascuna di queste tratte, sottoposta nuovamente a sezionamento dicotomico per N=100, sono state ulteriormente suddivise ri-sottoposte per l'ultimo sezionamento (N=50). In alcuni casi qualcuna delle nuove “sotto-tratte”sono risultate ancora non stazionarie, e quindi su queste si è operato l'ultimo sezionamento per N=50; unico caso in tabella per la sotto-tratta A13\_L3.2.6. Il risultato voluto è stato raggiunto: tutte le tratte sono anche stazionarie; lo scotto da pagare è nel numero maggiore di tratte finali, perché via via si

diminuisce  $N$ , resta comunque un incremento controllato, perché relativo alla tratta locale e

0°STEP					1°STEP					2°STEP				
Profilo A13_L3 sottoposto a					Sezionamento dicotomico delle sez NN					Sezionamento dicotomico delle sez NN				
N=200, prf=2.5%					N=100, prf=2.5%					N=50, prf=2.5%				
n° tratta	Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	n° tratta	Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	n° tratta	Km iniziale	Km finale	Media	Varianza
1	63	101.4	6.38E-02	2.52E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	101.4	207	0.144724	0.018163	A13_L3.2.1	101.5	114	9.85E-02	2.70E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.2.2	114	135.3	8.75E-02	3.00E-04	-	-	-	-	-
					A13_L3.2.3	135.3	146.7	7.61E-02	1.31E-04	-	-	-	-	-
					A13_L3.2.4	146.7	157.4	9.37E-02	4.30E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.2.5	157.4	168.9	8.01E-02	1.27E-04	-	-	-	-	-
					A13_L3.2.6	168.9	192.5	1.27E-01	3.13E-03	A13_L3.2.1	169	188.6	0.103338	1.75E-04
					A13_L3.2.7	192.5	207	4.85E-01	9.37E-03	A13_L3.2.2	188.6	192.5	0.21105	1.76E-03
3	207	263.3	6.72E-02	4.52E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	263.3	294.6	5.40E-02	1.05E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	294.6	332.1	6.68E-02	1.09E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	332.1	396.2	3.96E-02	2.65E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	396.2	427.4	5.70E-02	1.12E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	427.4	450.2	0.041819	2.38E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	450.2	478.5	0.049607	8.05E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	478.5	509.5	0.067267	1.15E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	509.5	582.5	5.32E-02	1.64E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	582.5	621.9	5.96E-02	2.06E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	621.9	690.8	0.083704	0.000343	A13_L3.13	622	627.5	6.52E-02	1.80E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.13	627.5	640.1	9.85E-02	7.44E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.13	640.1	657.4	7.03E-02	9.32E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.13	657.4	690.8	8.88E-02	3.86E-04	-	-	-	-	-
14	690.8	714.9	6.45E-02	1.24E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	714.9	742.6	5.27E-02	1.20E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	742.6	789.9	0.107517	4.50E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	789.9	825.2	4.87E-02	5.20E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	825.2	869.1	5.93E-02	7.90E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	869.1	935.7	5.17E-02	1.97E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	935.7	964.5	6.03E-02	7.20E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	964.5	997.6	0.056135	4.8E-05	A13_L3.21	964.6	975.6	5.02E-02	6.80E-06	-	-	-	-	-
					A13_L3.21	975.6	985.7	6.11E-02	5.26E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.21	985.7	997.6	5.68E-02	3.67E-05	-	-	-	-	-
22	997.6	1036.5	8.10E-02	2.21E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	1036.5	1098.4	6.88E-02	2.65E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1098.4	1140.1	4.93E-02	2.84E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	1140.1	1165.8	6.60E-02	2.04E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	1165.8	1196.6	5.49E-02	1.19E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	1196.6	1223.1	0.03915	5.00E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	1223.1	1254.8	0.049756	8.96E-05	A13_L3.28	1223.2	1230.5	6.63E-02	2.53E-05	-	-	-	-	-
					A13_L3.28	1230.5	1254.8	4.59E-02	3.01E-05	-	-	-	-	-
29	1254.8	1282.3	3.74E-02	2.29E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	1282.3	1311.2	0.087388	0.001106	A13_L3.30	1282.4	1301.5	6.74E-02	2.02E-04	-	-	-	-	-
					A13_L3.30	1301.5	1311.2	1.33E-01	2.33E-04	-	-	-	-	-
31	1311.2	1356.3	5.40E-02	2.13E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	1356.3	1405.1	4.75E-02	4.56E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	1405.1	1475.4	4.11E-02	2.37E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	1475.4	1554.2	4.67E-02	6.56E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	1554.2	1574.5	6.59E-02	6.87E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	1574.5	1603.5	4.96E-02	4.37E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	1603.5	1639.8	3.90E-02	4.10E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	1639.8	1686.2	5.06E-02	1.40E-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	1686.2	1712.8	4.74E-02	3.55E-05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tabella 5. 10** Risultati parziali del sezionamento dicotomico operato sul profilo A13\_L3.

non esteso a tutto il profilo.

## 5.4 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA OTTIMALE

Attraverso lo studio di affinamento delle varie tecniche e combinazioni di analisi perseguite durante l'attività di ricerca svolta, si è pervenuti a definire una procedura, che per il nostro caso studio si è rilevata quella ottimale, sintetizzata nei seguenti punti:

- Ciascun profilo deve essere espresso nel dominio delle accelerazioni spaziali;

- b) Su ciascun profilo di accelerazione, si ricercano i transienti secondo la Teoria del Mean Square (o di Rouillard);
- c) I transienti individuati nel punto b) devono essere rimossi dal profilo originale, per mezzo del filtro K2;
- d) In seguito, il profilo filtrato, è sottoposto a sezionamento dicotomico iterato, per N decrescente, ogni volta che una tratta omogenea, risulti non stazionaria se sottoposta a test Chi-Q;
- e) Infine si otterrà un profilo depurato dei transienti e riconducibile ad una serie di tratte stazionarie;
- f) La loro stazionarietà permette di caratterizzare la regolarità con opportuni indici sintetici (RMSVA) o in base al contenuto spettrale (PSD) al fine di ricavare modelli di decadimento.

Tale procedura è stata infine applicata per caratterizzare la regolarità di 14 profili, in termini di indice spettrale, PSD, rappresentata nella forma smoothed (APPENDICE C). Nota la PSD nella forma smussata, è stato possibile operare una regressione lineare in un sistema di riferimento bi-logaritmico mediante l'espressione:

$$\ln(G_s) = A + B \cdot \ln(n)$$

che nel sistema di riferimento normale diviene:  $G_s = e^A n^B$ , dove  $A$  e  $B$  rappresentano le costanti della regressione ricavata sperimentalmente.

Nella Tabella 5. 11 si riporta una sintesi dei dati ottenuti dall'elaborazione, che ha permesso di caratterizzare la regolarità della pista di Ciampino in termini di:

- ☞ Numerosità dei transienti totali individuati e rimossi lungo ciascun profilo;
- ☞ Crest Factor, associato a ciascun transiente;
- ☞  $A$  e  $B$ , parametri regressivi della retta PSD smoothed.

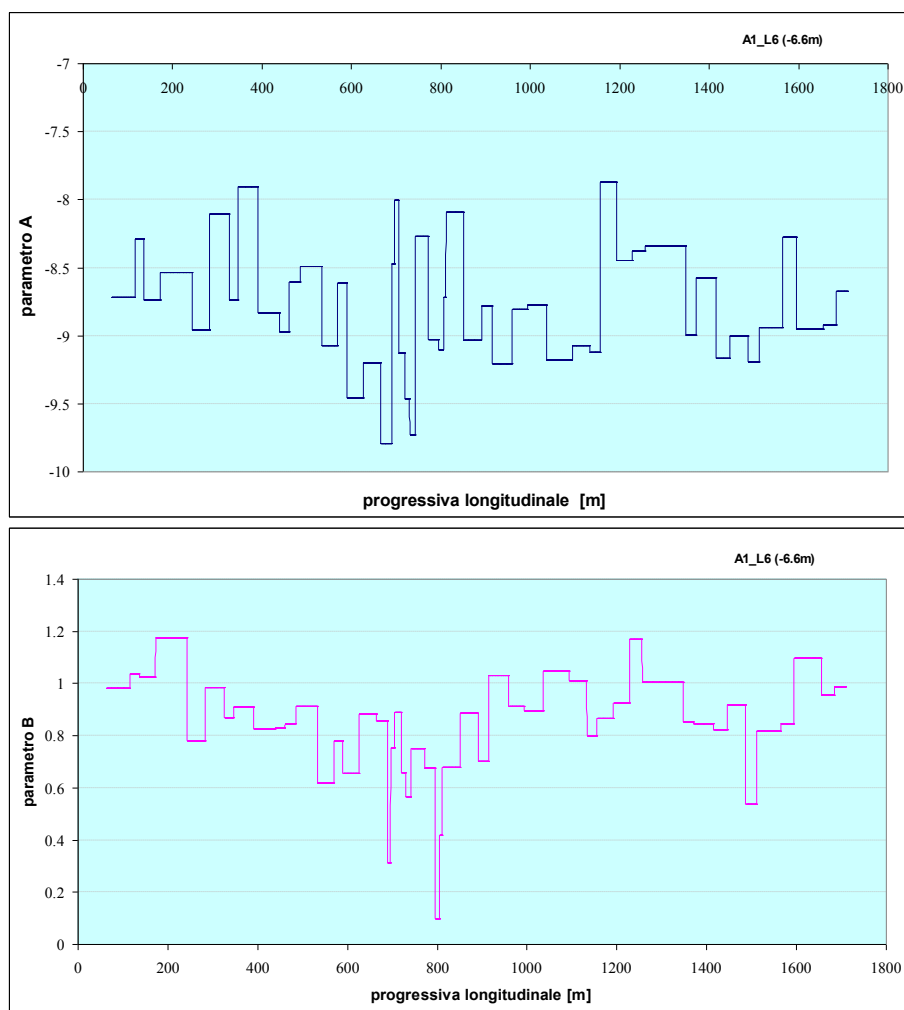
In Figura 5. 11, a titolo di esempio, si riporta un tipico esempio di sezionamento in tratte omogenee, ottenuto su ciascun profilo; ogni tratta è stata sottoposta a verifica di stazionarietà



Infine ciascuna tratta stazionaria è stata caratterizzata in termini di PSD smoothed, per cui è stato possibile associare a ciascuna di essa i due valori regressivi: A e B.

ID allineamento	ID profilo	progr. [m]	n° transienti	L totale transienti	CF medio	parametro A			parametro B		
						media	dev.stand	CV	media	dev.stand	CV
A13	L3	6.6	37	44.2	3.3624614	-9.0011463	0.6636821	0.0737331	0.954478	0.149119424	0.156231321
A1	L1	0.25	41	51.9	3.316108	-8.6443237	0.451664	0.0522498	0.895475	0.211240946	0.235898266
A1	L2	0.7	31	37.1	3.3139904	-8.8294461	0.3941349	0.0446387	0.877792	0.218210724	0.248590606
A1	L3	1	32	35.8	3.4003534	-8.7218022	0.4638186	0.0531792	0.861436	0.186280133	0.216243765
A1	L4	1.3	28	36.8	3.4188509	-8.7287433	0.5401538	0.0618822	0.867856	0.216687933	0.249681849
A1	L5	1.65	30	38.6	3.3084145	-8.7436103	0.4473758	0.051166	0.86702	0.173256597	0.199830008
A1	L6	1.75	25	32.7	3.3734311	-8.7519562	0.4142829	0.047336	0.890615	0.160996759	0.180770254
A3	L3	3.2	64	82.1	3.3283015	-8.6603207	0.5116843	0.0590838	0.876437	0.220935327	0.252083643
A2	L2	4.7	75	91.9	3.3456345	-8.4689491	0.5962097	0.0703995	0.862136	0.243564433	0.282512755
A2	L3	5	77	99.3	3.3731213	-8.5830707	0.5664126	0.0659918	0.877416	0.210654373	0.240084995
A2	L5	5.65	36	42.9	3.3645064	-8.677891	0.5697505	0.0656554	0.889671	0.247258772	0.277921639
A4	L3	7	34	39	3.4080169	-8.8804857	0.553324	0.0623079	0.892246	0.232869141	0.26099199
A6	L3	11.5	52	66	3.260346	-8.670403	0.6410349	0.0739337	0.999705	0.175069012	0.175120758
A8	L3	16.8	90	101.6	3.37	-9.1892185	0.7702934	0.0838258	0.922304	0.199437049	0.216237897

**Tabella 5. 11** Risultati finali dell'applicazione della metodologia ottimale.



**Figura 5. 11** Output finale del sezionamento iterato su un dato profilo.

Secondo il modello ECs, invece sono stati ricavati secondo il modello ECs, per diversi 4 esponenti, ovvero criteri di omogeneizzazione del danno (Tabella 5. 12).

Progr. [m]	ECs				
	esp = 0	esp = 1	esp = 2	esp = 3	esp = 4
6.6	74660	92787.5	144425	258875	504925
0.25	4430000	2533000	2059000	1952000	2072000
0.7	4285750	2202500	1697000	1556500	1586500
1	4207750	2030000	1511000	1358500	1352500
1.3	4155500	1915000	1388250	1229750	1202750
1.65	4132000	1863000	1333000	1172000	1137000
1.75	4135500	1871000	1341500	1181000	1147000
3.2	4478750	2653750	2193250	2104250	2267750
4.7	4437500	3398500	3208500	3497750	4474000
5	4228250	3344500	3234000	3634250	4828750
5.65	3540000	2973000	3037000	3669000	5293000
7	1719500	1617250	1894750	2689000	4503750
11.5	7800.25	9584.5	14405	25022.5	47717.5
16.8	182.04	167.22	162.40	166.09	177.79

**Tabella 5. 12** Ricoprimenti Equivalenti per i diversi criteri di omogeneizzazione

Nelle figure successive sono riportati gli andamenti dei ricoprimenti in funzione della posizione trasversale e i corrispondenti valori dei parametri descrittivi delle regolarità.

Da una prima analisi si evince che il criterio di equivalenza del danno che presenta un miglior accordo con i dati di irregolarità è quello caratterizzato da un esponente pari a 1.

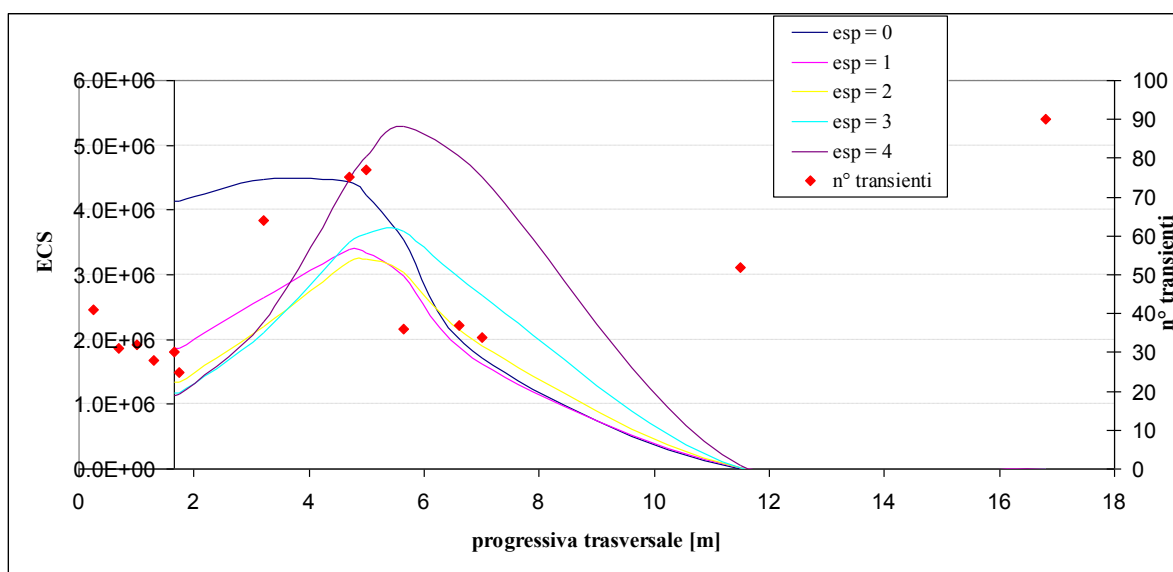


Figura 5.12 Numerosità dei transienti vs i ricoprimenti equivalenti

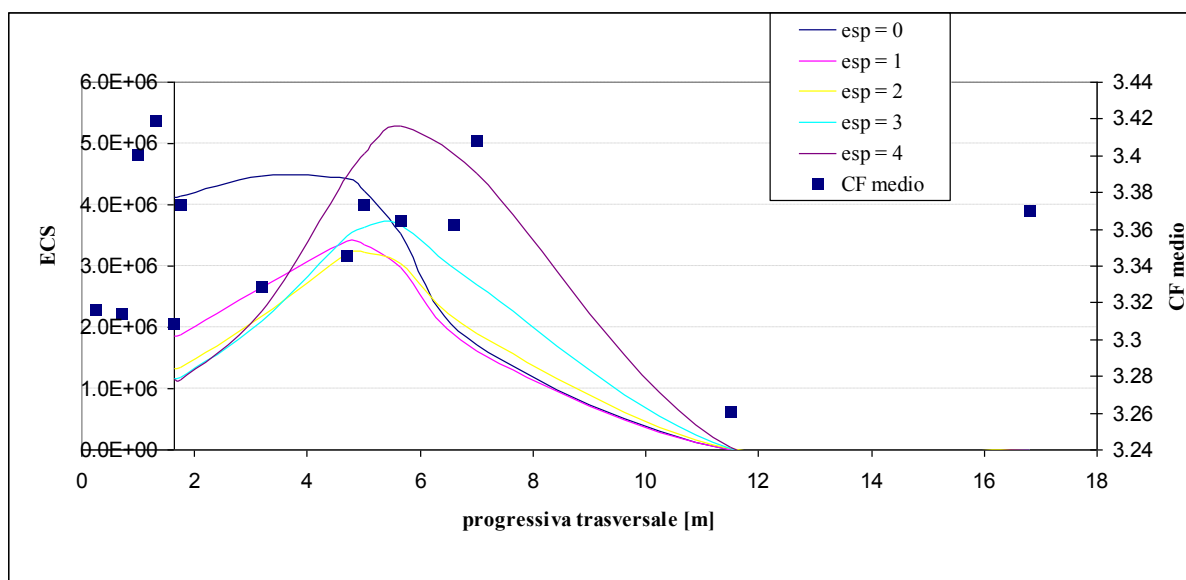


Figura 5.13 Crest Factor medio vs i ricoprimenti equivalenti

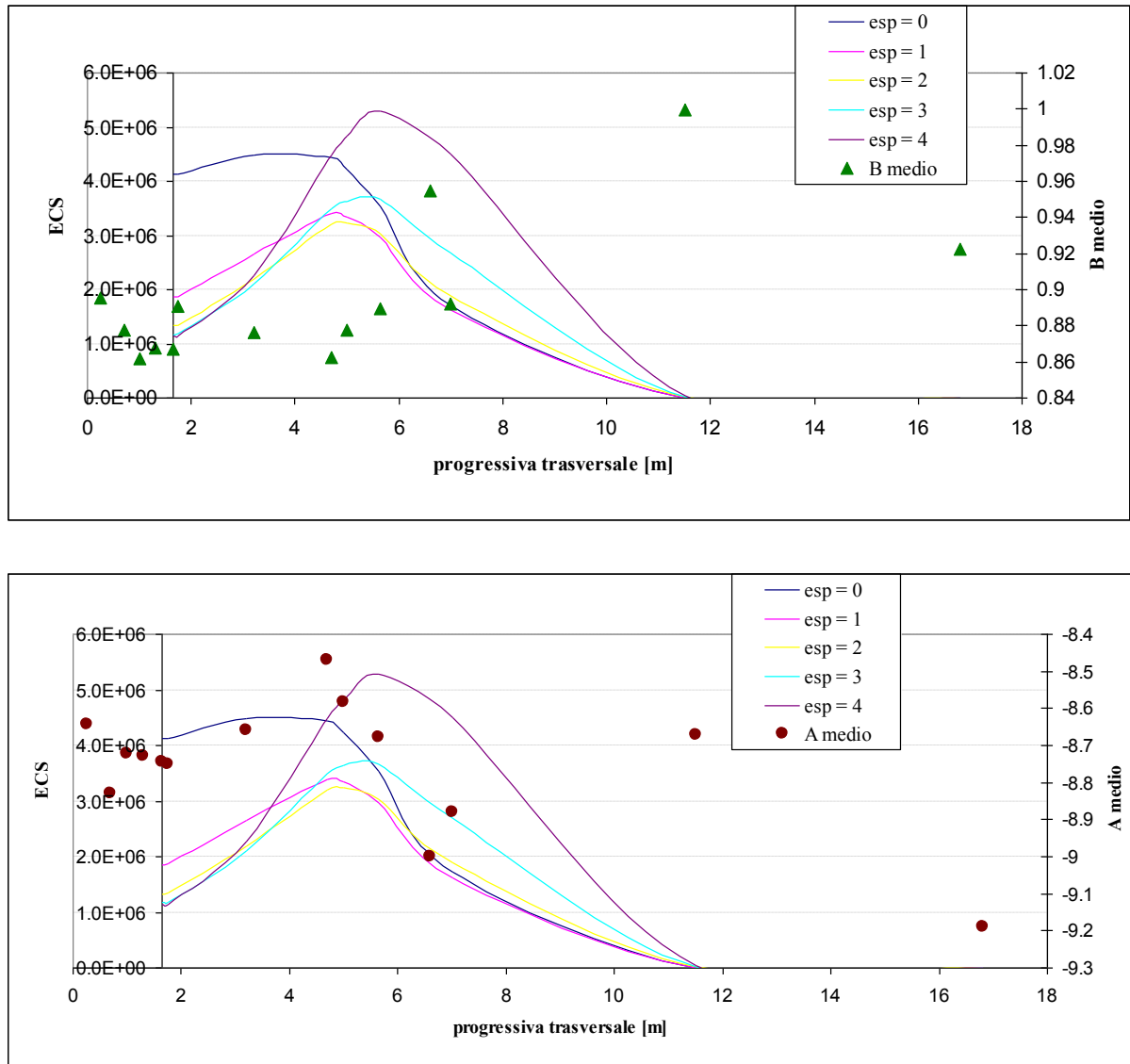
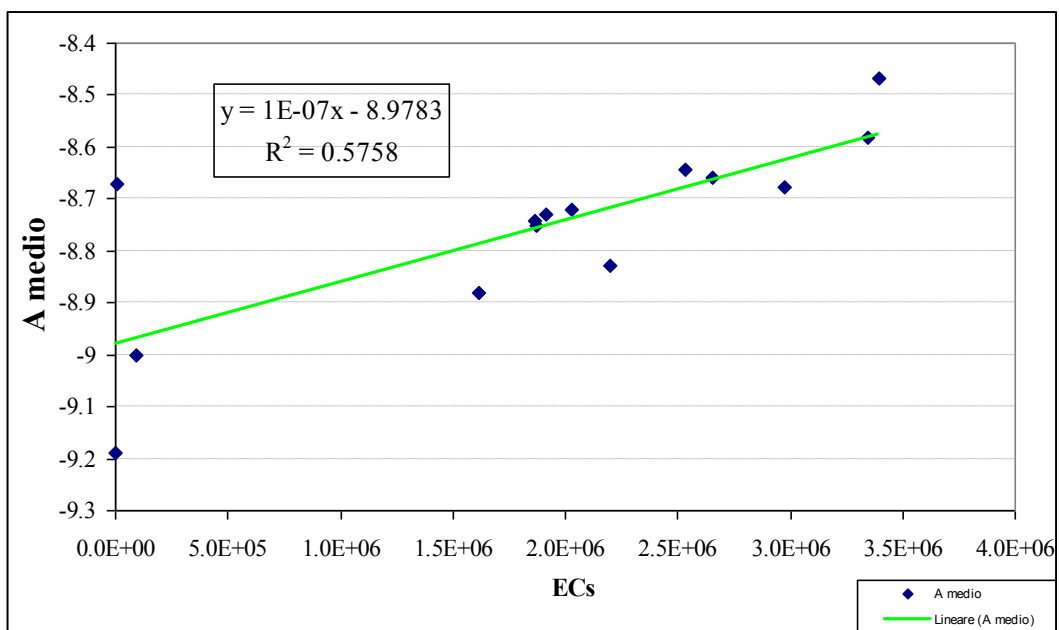
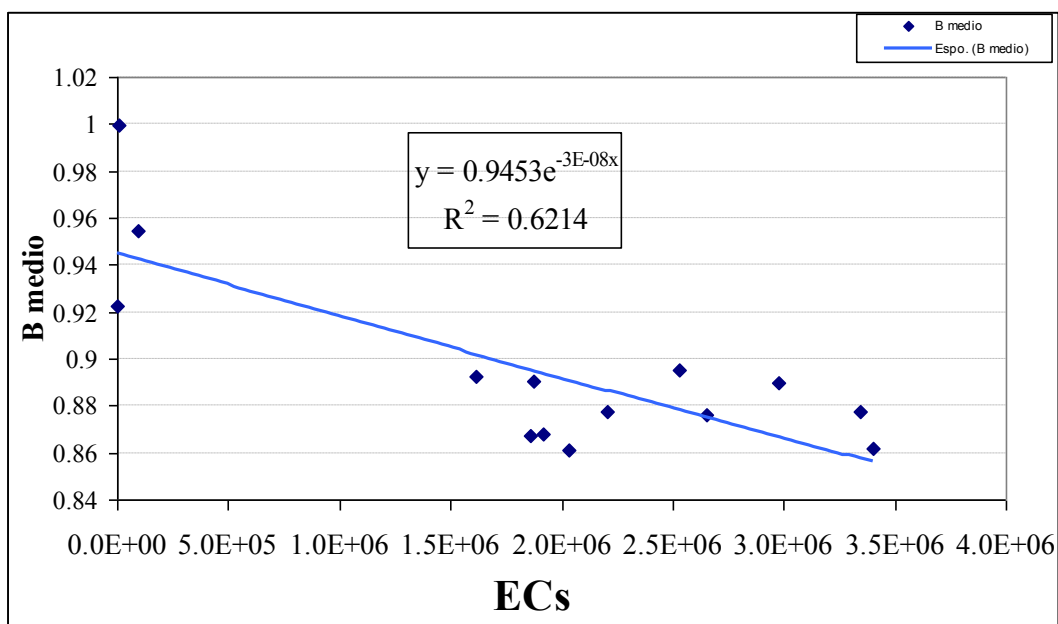


Figura 5. 14 Parametri A (in basso) e B (in alto) vs i ricoprimenti



**Figura 5. 15** Modello di degrado del parametro A medio



**Figura 5. 16** Modello di degrado del parametro B medio

## **VI CAPITOLO**

### ***CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI***

L'obiettivo principale della presente attività di ricerca è stato quello di sviluppare una metodologia ottimale per la misura e l'analisi della regolarità delle piste aeroportuali al fine di:

1. identificare le due componenti principali della irregolarità delle pavimentazioni ovvero quella legata alle singolarità del profilo (bumps) e quella di tipo stazionario;
2. individuare tratte omogenee per livello e caratteristiche di irregolarità;
3. pervenire ad una più efficace e speditivo sviluppo di modelli di degrado di tipo empirico della irregolarità in campo aeroportuale.

In relazione al primo punto, occorre ricordare che ai fini della gestione della manutenzione delle pavimentazioni, così come evidenziato nella numerosa letteratura tecnico-scientifica prodotta in ambito stradale, conviene separare la componente di tipo transiente legata alle singolarità del profilo (risalti localizzati o buche che vengono comunemente definiti come “bumps” secondo la dizione anglossassone) da quella stazionaria che può vedersi come una irregolarità di tipo “distribuito”.

In relazione a quest'ultima proprietà, in termini più rigorosi, un profilo longitudinale si può considerare omogeneo nei riguardi della regolarità se può essere descritto attraverso un processo aleatorio di tipo stazionario ed ergodico. Tale requisito può essere verificato operando opportuni test statistici di stazionarietà su una sezione di lunghezza finita del profilo precedentemente identificata come “omogenea” mediante opportune tecniche di sezionamento.

La separazione tra componente transiente e quella stazionaria è funzionale alla gestione della manutenzione ed alla ottimizzazione degli interventi in quanto da un lato, consente di individuare e “correggere” aree localizzate e confinate dove si attingono elevati livelli di

irregolarità senza dover intervenire su tutta la pavimentazione e dall'altro permette di individuare sezioni di pavimentazione di lunghezza adeguata dove le caratteristiche di irregolarità possono considerarsi omogenee così come le corrispondenti modalità di evoluzione della irregolarità stessa, ai fini dello sviluppo di eventuali modelli di degrado ed in generale di una più razionale pianificazione degli interventi di manutenzione nel tempo.

Occorre osservare che il problema legato alla identificazione delle irregolarità localizzate e quello relativo alla individuazione di tratte omogenee/stazionarie sono intimamente correlati, potendo le procedure di identificazione dei transienti influenzare le modalità di sezionamento in tratte stazionarie dei profili.

Da una analisi della letteratura tecnica si è potuto evincere che la separazione della componente transiente o “localizzata” da quella stazionaria o “distribuita” sebbene sia adottata in ambito stradale non risulta implementata con altrettanta efficacia in ambito aeroportuale. Si è pertanto valutata la possibilità di trasferire ed adattare le metodiche di analisi dei profili concepite in ambito stradale al caso aeroportuale.

In particolare, sono state studiate ed adattate due tecniche di analisi dei profili longitudinali acquisiti su piste aeroportuali basate principalmente su un approccio di tipo spettrale dettagliate nel prosieguo.

Metodologia 1. Tale approccio prevede una iniziale identificazione delle irregolarità localizzate sulla derivata seconda del profilo (profilo della accelerazione spaziale) secondo una procedura già proposta in letteratura da Bruscella et alii. Rispetto però all'approccio proposto da tali autori si è sviluppato un originale algoritmo di smoothing del profilo al fine di rimuovere la singolarità senza pregiudicare lo sviluppo effettivo dello stesso profilo. Il profilo così “depurato” dai transienti viene sottoposto ad algoritmi di sezionamento per ricondurlo ad una successione di tratte omogenee su cui si procede ad una verifica di stazionarietà.

Metodologia 2. Tale approccio prevede una iniziale filtraggio del profilo della accelerazione spaziale attraverso le trasformate wavelet al fine di ottenere una scomposizione in sotto-profilo a cui applicare l'algoritmo di identificazione delle irregolarità localizzate e la

successiva rimozione attraverso un processo di smoothing precedentemente richiamati. Anche in tal caso, il profilo così “depurato” dai transienti viene sottoposto ad algoritmi di sezionamento per ricondurlo ad una successione di tratte omogenee su cui si procede ad una verifica di stazionarietà.

In relazione alle tecniche di sezionamento si è condotta una preliminare analisi critica delle tecniche di individuazione delle tratte omogenee correntemente impiegate nel trattamento dei dati relativi ai parametri di stato delle pavimentazioni stradali per valutarne l'applicabilità in ambito aeroportuale. Tra le diverse tecniche proposte in letteratura, quella sviluppata da Lebas et alii (Metodo Dicotomico) è sembrata più promettente ai fini della individuazione delle tratte stazionarie.

Le due tecniche di analisi (Metodologia 1 e 2) sono state applicate ad una serie di profili acquisiti su una pista aeroportuale italiana. I risultati ottenuti hanno evidenziato che la Metodologia 2 basata su un pre-trattamento mediante scomposizione Wavelet risulta caratterizzata da un maggior numero di transienti e da un minor numero di tratte stazionarie rispetto alla Metodologia 1. Pertanto ai fini della gestione della manutenzione, quest'ultima appare più efficiente.

Un aspetto di non secondaria importanza nella costruzione di un Sistema di Gestione della Manutenzione delle pavimentazioni in ambito aeroportuale (APMS) è relativo allo sviluppo di adeguati modelli di degrado dei parametri di stato delle pavimentazioni. Un modello di degrado è in generale un modello matematico di derivazione empirica e/o meccanicistica in grado di fornire una previsione dell'evoluzione di uno specifico parametro di stato della pavimentazione in funzione di una serie di variabili indipendenti legate al traffico, alle caratteristiche delle pavimentazioni e delle miscele ed alle condizioni di sito. Nella gestione



della manutenzione la previsione del degrado è funzionale alla scelta e programmazione degli interventi di manutenzione nel tempo.

In relazione a questo problema, come già accennato in precedenza, nel presente lavoro di ricerca, si è inteso sviluppare una metodologia di misura e di analisi della regolarità delle piste aeroportuali al fine di pervenire ad un più efficace e speditivo sviluppo di modelli di degrado della regolarità in ambito aeroportuale. A tale proposito, occorre precisare che in ambito aeroportuale esistono pochissimi esempi di modelli di degrado sviluppati per le pavimentazioni.

Tale metodologia si fonda sulla variabilità del danno indotto dal traffico aereo lungo la direzione trasversale della pista per effetto della diversa distribuzione delle traiettorie degli aeromobili osservata sperimentalmente nelle operazioni di decollo e di atterraggio. Il danno così indotto nella pavimentazione condiziona nel tempo il livello di irregolarità.

Pertanto, se si ha la possibilità, da un lato, di operare misure di profilo lungo diversi allineamenti longitudinali al variare della loro posizione trasversale e dall'altro, di stimare il numero di passaggi (o ricoprimenti), operato dai diversi aeromobili che compongono lo spettro di traffico (opportunamente omogeneizzati in base ad uno specifico criterio di equivalenza del danno) in corrispondenza di tali allineamenti, è possibile ricavare una correlazione tra livello di irregolarità e numero di ricoprimenti/passaggi che nei fatti costituisce un modello di degrado di tipo empirico.

Tale approccio è stato applicato ad una serie di profili acquisiti su una pista aeroportuale italiana. I risultati forniti da analisi preliminari hanno evidenziato che partizionando lungo la direzione longitudinale la pista aeroportuale in quattro zone omogenee da un punto di vista delle operazioni e rappresentando l'irregolarità attraverso parametri di tipo sintetico (RMSVA) si riescono ad ottenere dei modelli di degrado di tipo empirico caratterizzati da livelli di correlazione più che soddisfacenti e comunque sensibilmente più elevati di quelli presentati nella letteratura tecnica in ambito stradale.

Si è inoltre proposta una originale tecnica di campionamento ottimale degli allineamenti longitudinali al fine di sviluppare modelli di degrado statisticamente significativi con un minor numero di misure.

Successive analisi condotte mediante la metodologia 1 di caratterizzazione dei profili precedentemente descritta hanno consentito di sviluppare modelli di degrado della regolarità in funzione del numero di ricoprimenti che risultano affetti da un minor grado di correlazione anche se ugualmente significativo. In questo caso i parametri descrittivi della regolarità sono stati i coefficienti A e B che caratterizzano i modelli linearizzati delle funzioni di densità spettrale di potenza (PSD) della accelerazione spaziale, secondo quanto prescritto nella norma ISO8608, e la numerosità e severità dei transienti (quest'ultima espressa attraverso il Crest Factor).

Gli sviluppi futuri prevedono di:

1. estendere tali metodologie di misura ed analisi ad altri siti aeroportuali al fine di confermare i risultati finora ottenuti;
2. affinare la procedura di analisi dei profili introducendo una esplicita modellazione dell'interazione dinamica tra aeromobile e pavimentazione al fine di pervenire allo sviluppo di modelli di degrado di tipo meccanicistico e semi-empirico e quindi di carattere generale che possano essere impiegati in realtà aeroportuali diverse da quelle indagate.

## APPENDICE A

### CRITERI DEL METODO DICOTOMICO (FRANCESE)

In questo appendice, sono illustrati i criteri su cui si basa il metodo in esame proposto dal Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), e già introdotto nel paragrafo 4.4.1.

Rientra nella categoria dei metodi di sezionamento di tipo lineare, nei quali i dati vengono analizzati in maniera sequenziale (aggregando sotto-sezioni di lunghezza minima o suddividendo progressivamente in tratto in sottosezioni), individuando i probabili punti di transizione tra una sotto-sezione omogenea e la successiva. L'impiego di tali metodi di sezionamento non garantisce l'individuazione della segmentazione ottimale del tratto di misura in esame, ma il loro utilizzo è molto diffuso poiché sono di facile implementazione.

I criteri alla base del metodo di sezionamento LCPC sono essenzialmente due:

- A.1 Criterio per verificare l'omogeneità dei dati all'interno di una sezione;
- A.2 Criterio di suddivisione in grado di individuare il punto in cui si verificano variazioni significative nella sequenza dei dati.

#### A. 1 CRITERIO PER LA VERIFICA DELL'OMOGENEITÀ

Nell'ipotesi che le misure appartengano ad una popolazione distribuita con legge Normale, si può verificare l'omogeneità di una sezione attraverso un test basato sulla media dei quadrati delle differenze successive.

Se le misure  $n$  sono più di 25 la quantità:

$$u = (1 - r) \cdot \sqrt{\frac{n^2 - 1}{n - 2}}$$

Dove:

$$r = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (x_{j+1} - x_j)^2}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}$$

è distribuita come una variabile aleatoria Normale standard.

Detta pertanto  $u_\alpha$  il valore del percentile  $\alpha$  della variabile aleatoria Normale standard si ha che:

- se  $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$  la sezione è omogenea;
- se  $u > u_{1-\alpha}$  vi sono delle variazioni sistematiche lente o dei raggruppamenti anomali;
- se  $u < u_\alpha$  vi sono delle fluttuazioni rapide nei dati, indicanti generalmente degli errori di misura.

Nelle relazioni precedentemente scritte,  $\alpha$  rappresenta la probabilità di affermare a torto che l'indicatore  $u$  non appartiene ad una popolazione distribuita come una variabile aleatoria Normale Standard (probabilità di falso rifiuto).

## **A. 2 CRITERIO PER SUDDIVIDERE LE SEZIONI NON OMOGENEE**

Nel caso in cui la sezione non sia omogenea, ossia se non risulta  $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$ , si pone il problema di individuare il punto di frontiera, il break point, tra le due zone omogenee in essa eventualmente presente; ciò viene perseguito con l'ausilio di un metodo dicotomico che utilizza le proprietà di composizione della varianza.

Se  $n$  è il numero totale delle misure effettuate e  $\bar{x}$  il valore medio definito  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$ ,  $S$  la

somma dei quadrati degli scarti dal valore medio  $S = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2$ , allora  $S$  può essere

decomposto in una somma di quattro termini in funzione delle medie dei valori misurati nelle due zone:

- 1° zona: composta da  $i$  punti di misura con  $1 \leq j \leq i$ , in cui la media dei valori è  $\bar{x}_1$ ;
- 2° zona: composta da  $(n-i)$  punti di misura con  $i+1 \leq j \leq n$ , in cui la media dei valori è  $\bar{x}_2$ ;

$$\text{con } \bar{x}_1 = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i x_j, \quad \bar{x}_2 = \frac{1}{(n-i)} \sum_{j=i+1}^n x_j.$$

Pertanto risulta:

$$S = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2 + i \cdot (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (n-i) \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x})^2$$

ma ponendo

$$W = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2, \quad B = i \cdot (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (n-i) \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x})^2$$

si ha

$$S = B + W$$

dove

- $W$  rappresenta la somma dei quadrati degli scarti all'interno delle zone omogenee;
- $B$  rappresenta la somma dei quadrati degli scarti tra le zone omogenee.

La grandezza  $S$  è costante per una fissata serie di misure, mentre le grandezze  $W$  e  $B$  variano con  $j$ , che definisce la posizione del break point tra le due zone omogenee in cui può essere suddivisa la sezione iniziale che non ha soddisfatto il precedente criterio di omogeneità.

Si può osservare che il valore di  $j$  che individua la frontiera è quello che massimizza il rapporto  $B/W$ . Sviluppando i termini  $\sum_{k=1}^p (x_k - \bar{x})^2$  ed effettuando un cambiamento di origine,

le variabili iniziali  $x_j$  si trasformano nelle variabili  $y_j = x_j - \bar{x}$ , e si ha:  $\sum_{j=1}^n y_j = 0$

$$\text{da cui } \sum_{j=1}^i y_j = - \sum_{j=i+1}^n y_j, \quad \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 = \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2$$

Le espressioni di B e di W possono essere espresse in funzione della nuova variabile  $y_j$  e risultano pertanto essere:

$$B = \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^i y_j \right)^2 + 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^n y_j = \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2$$

$$W = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{(n-i+i)}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 - 2 \cdot \bar{x} \cdot \left( \sum_{j=1}^n y_j \right) = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2$$

Per una fissata serie di dati misurati si può porre:

$$\sum_{j=1}^n y_j^2 = cte, \quad g(i) = \frac{n}{i(n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2$$

da cui si ha:

$$W = cte - g(i), \quad B = g(i).$$

Il rapporto B/W assume il valore massimo in corrispondenza del massimo della funzione  $g(i)$ , pertanto la frontiera tra le due zone omogenee corrisponde alla progressiva del punto di misura i-esimo per il quale  $g(i)$  è massima.

## APPENDICE B

### TEST DI *GOODNESS-OF-FIT*

In generale quando si è chiamati a prendere delle decisioni su un'intera popolazione ( di individui, di misure, etc.), sulla base dei dati ottenuti su un campione di essa, è necessario formulare delle ipotesi, dette ipotesi statistiche, la cui veridicità deve essere verificata; il processo che consente di accettare o rifiutare un'ipotesi statistica utilizzando i dati di un campione viene chiamato test di ipotesi.

Nella pratica sperimentale, è frequente la necessità di verificare se esiste accordo tra una distribuzione osservata e la corrispondente distribuzione attesa o teorica. In tal caso il test viene definito test per la bontà di adattamento ( in inglese, *Goodness-of-fit test* ); quindi il problema statistico è di poter dedurre scientificamente, ed in modo universalmente accettato, se:

- ✦ le differenze sono trascurabili e quindi probabilmente dovute solo al caso; tale asserzione è detta **ipotesi nulla**, indicata con  $H_0$ ;
- ✦ le differenze sono di dimensioni tali da far supporre, in maniera più ragionevole, una distribuzione realmente diversa da quella attesa; si parla in tal caso di **ipotesi alternativa**, indicata con  $H_A$ .

Dopo aver formulato le ipotesi, occorre specificare quale risultato del campione porterà al rifiuto dell'ipotesi nulla; in generale utilizzando le proprietà della distribuzione di campionamento della statistica soggetta a test, che solitamente s'identifica con la distribuzione Normale, si può individuare un intervallo di valori di quella statistica che verosimilmente non si presentano se l'ipotesi nulla è vera.

La distribuzione di campionamento della statistica test è divisa in due regioni, una di rifiuto ed una di accettazione: la prima corrisponde all'insieme dei valori della statistica campionaria che

conducono al rifiuto dell'ipotesi nulla, la seconda corrisponde all'insieme di valori che portano invece all'accettazione di  $H_0$ ; le zone suddette sono delimitate dai cosiddetti valori critici.

Ogni qual volta si esegue un test di ipotesi si corre sempre il rischio di giungere ad una conclusione sbagliata, commettendo essenzialmente due tipi di errori:

- si commette un **errore del I tipo** se l'ipotesi  $H_0$  è vera ma viene erroneamente rifiutata; la probabilità di commettere questo errore si indica con  $\alpha$ ;
- si commette un **errore del II tipo** se l'ipotesi  $H_0$  è falsa ma viene erroneamente accettata; la probabilità di commettere questo errore si indica con  $\beta$ .

Il metodo, che nelle applicazioni si utilizza con maggiore frequenza, consiste nello specificare un valore di  $\alpha$ . Per convenzione internazionale, i **livelli di soglia delle probabilità  $\alpha$**  ai quali di norma si ricorre sono due: 0.05 (5%) e 0.01 (1%).

Pertanto, scelto il livello di significatività  $\alpha$  a cui si vuole eseguire il test, in funzione di esso si determina la regione di rifiuto, e successivamente si procede dapprima al calcolo del valore della statistica test dai dati del campione e poi al confronto di quest'ultimo con i valori critici, affinché si possa prendere una decisione: rifiutare o non rifiutare l'ipotesi nulla al livello di significatività stabilito.

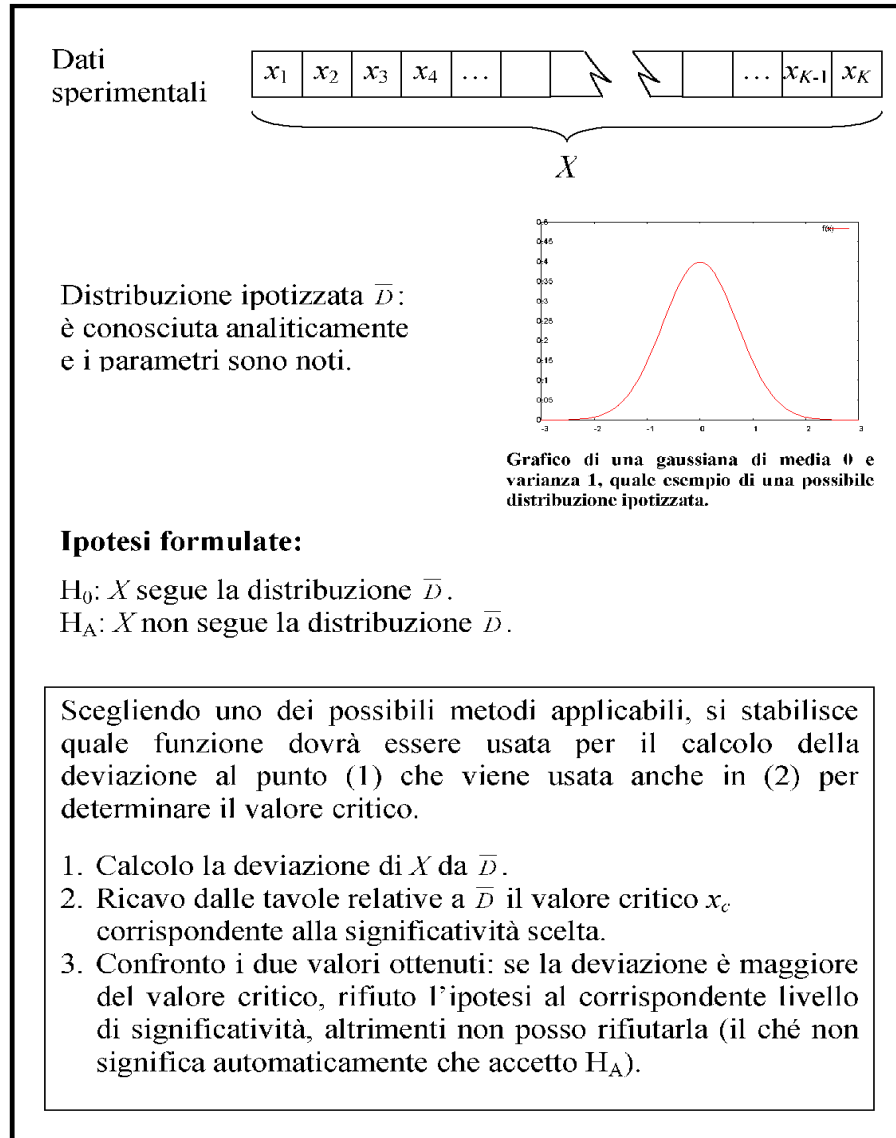
È importante tener presente che con la verifica delle ipotesi, e in generale con l'inferenza statistica, non si arriva alla dimostrazione di un'ipotesi; si ha solo un'indicazione del fatto che l'ipotesi sia o non sia avvalorata dai dati disponibili. Quando non si rifiuta un'ipotesi nulla, non si afferma che essa è vera, ma che può essere vera; in altre parole se non rifiutiamo l'ipotesi nulla, possiamo solo concludere che il campione non fornisce prove sufficienti a garantirne il rifiuto, ma ciò non implica alcuna dimostrazione.

Nei test statistici di adattamento, dal confronto tra la distribuzione osservata su un campione e la distribuzione teorica, che si ipotizza possa descrivere la popolazione da cui proviene il campione, si perviene ad una stima della bontà di adattamento.

Nella Figura A. 1 è illustrato lo schema generico utile per eseguire un test di adattamento: specificando il campione sperimentale  $X$  e la distribuzione teorica ipotizzata  $D$ , si definisce il



problema. Segue poi la formulazione delle ipotesi statistiche relative al test e il procedimento impiegato per verificare o confutare l'ipotesi.



**Figura A. 1** Schema del test di adattamento (o *Goodness-of-fit test*). Fonte: Tesi “Implementazione di metodi statistici per la verifica di ipotesi” di E.Franceschi

Tra i test Goodness-of-fit presenti in letteratura, se ne illustrano i due impiegati per le analisi effettuate e sono:

B.1 Chi-quadro;

B.2 Kolmogorov Smirnov secondo Lilliefors.

## B.1 TEST CHI - QUADRO ( CHI-Q )

Nel test  $\chi^2$  il numero d'osservazioni, sia in totale sia in ogni classe, determina la condizione essenziale di validità; esso, infatti, è valido solo se applicato a grandi campioni.

### B.1.1 Condizioni di validità:

#### I. Sul numero totale di dati:

- a) Il test è tanto più valido quanto più elevato è il numero totale di osservazioni;
- b) Per i campioni di dimensioni inferiori a 200 ma superiori a 30 bisogna apportare la **correzione di Yates o correzione di continuità**, che consiste nel sottrarre 0.5 ad ogni scarto in valore assoluto:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\left( |f_i^{oss} - f_i^{att}| - 0.5 \right)^2}{f_i^{att}} \quad \text{per } 30 < N < 200$$

mentre per campioni di dimensioni superiori a 200

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\left( f_i^{oss} - f_i^{att} \right)^2}{f_i^{att}} \quad \text{per } N > 200$$

- c) Il test perde ogni attendibilità, quando il numero d'osservazioni è inferiore a 30;

#### II. Sul numero di frequenze:

- d) La procedura del test chi-quadro di adattamento è valida purchè le frequenze assolute attese, entro ciascuna classe, siano tutte maggiori o uguali a 5. Se, dopo aver calcolato le frequenze attese, si osserva che qualcuna di queste è minore di 5, bisogna accorpare opportunamente due o più classi contigue, in modo che la condizione sia verificata. Dopo aver accorpato le classi, il numero di classi da considerare per calcolare il grado di libertà della distribuzione è quello ridotto e non quello originale.

### Numero delle classi (bins):

Uno dei problemi più rilevanti, nell'eseguire il test  $\chi^2$ , è quantificare correttamente il numero di classi di frequenza (number of bins) da utilizzare; tale scelta dipende strettamente dal numero totale di osservazioni.

Un numero troppo basso di classi, determina una perdita di informazioni sulle caratteristiche della distribuzione rendendola poco o per nulla significativa; un numero troppo elevato di classi invece disperde eccessivamente i valori e non rende manifesta la forma della distribuzione.

Generalmente, nella maggior parte dei casi, un numero di classi compreso tra 5 e 20 è sufficiente; ad ogni modo il numero di classi dovrebbe incrementare con  $N$ , numero di osservazioni totali; inoltre è preferibile adottare classi di uguale ampiezza per migliorare l'informazione visiva della distribuzione di frequenza.

Si sottolinea come la riduzione in classi di modalità riduce l'informazione originaria a sottoinsiemi più gestibili ma, ovviamente, da una tale distribuzione di frequenza non sarà più possibile risalire alla rilevazione originaria.

In letteratura, sono stati proposti vari metodi per stimare, in modo oggettivo, il numero ottimale di classi e fra questi i due più comuni sono:

(1) Metodo di *H. Sturges*:

sulla base del numero di osservazioni  $N$  ha indicato il numero ottimale di classi  $C$  mediante la relazione seguente

$$C = 1 + 3.3 \log_{10}(N)$$

(2) Metodo di *D. Scott*:

ha determinato l'ampiezza ottimale  $h$  delle classi, e quindi in modo indiretto il numero di esse, mediante la relazione

$$h = (3.5 * \sigma) / \sqrt{N}$$

con  $\sigma$  che indica la deviazione standard; per cui  $C$  è pari a

$$C = Range / h$$

dove *Range* indica l'intervallo di variazione, ottenuto come differenza tra il valore min e il valore max osservati nel campione.

## B.2. TEST KOLMOGOROV SMIRNOV ( KS ) secondo Lilliefors

Il test Kolmogorov Smirnov è anche detto distance test, in quanto fondato sulla logica che, se un campione fosse estratto da una determinata distribuzione attesa, la sommatoria della distribuzione osservata dovrebbe discostarsi dalla sommatoria della distribuzione attesa solo per fattori casuali.

Il confronto si realizza mediante il valore di massimo scarto tra le due distribuzioni cumulate (osservata e attesa):

$$KS = \max_{i \in 1..N} |F^*(X_i) - F(X_i)| \quad [1]$$

dove  $F^*(X_i)$  è la funzione di distribuzione cumulata attesa;

$F(X_i)$  è la funzione di distribuzione cumulata costruita sui dati del campione;

N è il numero totale di osservazioni.

Per tener conto del fatto che la distribuzione Normale è calcolata a partire dalla media e dalla varianza del campione, mentre nel ChQ le tabelle di riferimento dei valori critici sono quelle fornite da H.Lilliefors, molto diverse da quelle a cui fa riferimento Kolmogorov Smirnov originario.

Operativamente si procede nel modo seguente:

1. Si calcola il valore KS secondo la procedura classica di Kolmogorov Smirnov [1];
2. Si modifica KS ottenuto nel punto precedente, ottenendo  $KS^*$ , come segue:

$$KS^* = KS \cdot (\sqrt{N} - 0.01 + 0.85 / \sqrt{N});$$

3. Si confronta  $KS^*$  con il valore critico  $KS_\alpha$ , funzione del livello di significatività  $\alpha$ : ad esempio per  $\alpha$  pari a 0.05 e 0.01,  $KS_\alpha$  assume rispettivamente i valori 0.895 e 1.035 (vedi Fig. 3);

4. Si accetta l'ipotesi nulla  $H_0$  se risulta:

$$KS^* < KS_\alpha$$

altrimenti si rifiuta  $H_0$  e si accetta implicitamente l'ipotesi alternativa  $H_A$ .

Il test KS, che può essere applicato alla verifica della normalità per un campione, offre il vantaggio di poter essere utilizzato anche con pochi dati. Inoltre, quando la scala è una variabile continua, gli intervalli di classe possono essere molto piccoli e differenti tra loro: ne deriva un'analisi più sensibile.

## APPENDICE C

### PROCEDURA DI “SMOOTHING” SECONDO ISO8608

I profili reali sono abbastanza diversi da quelli convenzionali adottati nella classificazione ISO 8608, per questo i corrispondenti valori di PSD non sempre sono contenuti nei campi definiti dalle curve limite riportate in figura 3.3.5. Inoltre quando le funzioni PSD sono calcolate con larghezza di banda costante, la loro rappresentazione in un diagramma bi-logaritmico evidenzia una accentuata fluttuazione, alle alte frequenze, determinata dalla reale distribuzione della potenza e del “rumore” statistico.

Sono queste le principali ragioni per cui la stessa ISO raccomanda di rappresentare la PSD di un profilo stradale anche nella forma smussata, ottenuta quest’ultima calcolando la PSD media nelle seguenti bande d’ottava, individuate dagli estremi  $n_l$  e  $n_h$ , rispettivamente frequenza inferiore e frequenza superiore, e dalla frequenza centrale  $n_c$ :

- Bande di ottava, ciascuna identificata dalle seguenti frequenze:

$n_l = 2^{i-\frac{1}{2}}$ ,  $n_c = 2^i$ ,  $n_h = 2^{i+\frac{1}{2}}$ , con  $i$  numero intero; la media deve essere calcolata dalla più bassa frequenza di calcolo della PSD (escluso zero) fino alla banda di frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{-5}$  cicli/m = 0.0312 cicli/m;

- Bande di terzi di ottava, ciascuna identificata dalle seguenti frequenze:

$n_l = 2^{\frac{i-1}{3}}$ ,  $n_c = 2^{\frac{i}{3}}$ ,  $n_h = 2^{\frac{i+1}{3}}$ ; la media va calcolata in tal caso dall’ultima banda di ottava fino alla banda di frequenza centrale  $n_c = 2^{-6/3}$  cicli/m = 0.25 cicli/m;

- Bande di dodicesimi di ottava, ciascuna identificata dalle seguenti frequenze:

$n_l = 2^{\frac{i-1}{12}}$ ,  $n_c = 2^{\frac{i}{12}}$ ,  $n_h = 2^{\frac{i+1}{12}}$ ; la media deve essere calcolata dalla banda con frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{-22/12}$  cicli/m = 0.2806 cicli/m fino alla più alta frequenza di calcolo della PSD.

Nella suddivisione delle bande di ottava, riportata in tabella C.1, è possibile osservare una lieve sovrapposizione in corrispondenza dell'ultima banda di terzi di ottava caratterizzata da una frequenza  $n_h=0.2806$  cicli/m e la prima banda di dodicesimi di ottava con  $n_l=0.2726$  cicli/m; tuttavia l'effetto di tale sovrapposizione è ritenuto trascurabile dalla norma (ISO 8608 – Mechanical Vibration–Road Surface profiles–Reporting of measured data – september 2001).

Per ognuna delle bande sopra specificate, la PSD media si ottiene mediante la seguente espressione:

$$G_s(i) = \frac{[(n_L + 0.5)B_e - n_l(i)]G(n_L)}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{\sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j)B_e}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{[n_h(i) - (n_H - 0.5)B_e]G(n_H)}{n_h(i) - n_l(i)} \quad 1.$$

dove:

$$- \quad n_H = INT\left(\frac{n_h(i)}{B_e} + 0.5\right); \quad 2.$$

$$- \quad n_L = INT\left(\frac{n_l(i)}{B_e} + 0.5\right); \quad 3.$$

- $G_s(i)$  rappresenta la PSD smussata nella  $i$ -esima banda;
- $B_e$  è la risoluzione in frequenza con cui è fornita la serie di valori della PSD.

La procedura per il calcolo della PSD media in un'assegnata banda, definita nell'intervallo  $(n_l, n_h)$ , può essere sintetizzata nei passi seguenti:

- si individua la PSD come una serie di valori indicizzati, a partire dallo zero; a quest'ultimo indice corrisponderà il valore di PSD di frequenza  $n=0$  per cui si avrà  $PSD(0)=G(0)$ , mentre all'ultimo indice  $N$  corrisponderà il valore di PSD associato alla più alta frequenza di calcolo, per cui  $PSD(N)=G(N)$ ;
- si calcolano gli indici  $n_L$  e  $n_H$  corrispondenti alle frequenze limite della banda, mediante le relazioni (21.) e (22.);
- si ricava il valore medio (o smussato)  $G_s$  della banda, mediante la relazione (20.).

		$i$	$n_l$ [m-1]	$n_c$ [m-1]	$n_h$ [m-1]
bande di ottava	$n_l = 2^{i-\frac{1}{2}}$	-9	0.00138	0.00195	0.00276
	$n_c = 2^i$	-8	0.00276	0.00391	0.00552
		-7	0.00552	0.00781	0.01105
	$n_l = 2^{i+\frac{1}{2}}$	-6	0.01105	0.01563	0.02210
		-5	0.02210	0.03125	0.04419
bande di 1 / 3 di ottava		-13	0.04419	0.04961	0.05568
	$n_l = 2^{\frac{i}{3}-\frac{1}{6}}$	-12	0.05568	0.06250	0.07015
		-11	0.07015	0.07875	0.08839
	$n_c = 2^{\frac{i}{3}}$	-10	0.08839	0.09921	0.11136
		-9	0.11136	0.12500	0.14031
	$n_l = 2^{\frac{i}{3}+\frac{1}{6}}$	-8	0.14031	0.15749	0.17678
		-7	0.17678	0.19843	0.22272
		-6	0.22272	0.25000	0.28062
bande di 1 / 12 di ottava		-22	0.27263	0.28062	0.28884
		-21	0.28884	0.29730	0.30601
		-20	0.30601	0.31498	0.32421
		-19	0.32421	0.33371	0.34349
		-18	0.34349	0.35355	0.36391
		-17	0.36391	0.37458	0.38555
		-16	0.38555	0.39685	0.40848
		-15	0.40848	0.42045	0.43277
		-14	0.43277	0.44545	0.45850
		-13	0.45850	0.47194	0.48577
		-12	0.48577	0.50000	0.51465
		-11	0.51465	0.52973	0.54525
		-10	0.54525	0.56123	0.57768
		-9	0.57768	0.59460	0.61203
		-8	0.61203	0.62996	0.64842
	$n_l = 2^{\frac{i}{12}-\frac{1}{24}}$	-7	0.64842	0.66742	0.68698
		-6	0.68698	0.70711	0.72783
		-5	0.72783	0.74915	0.77111
	$n_c = 2^{\frac{i}{12}}$	-4	0.77111	0.79370	0.81696
		-3	0.81696	0.84090	0.86554
		-2	0.86554	0.89090	0.91700
	$n_l = 2^{\frac{i}{12}+\frac{1}{24}}$	-1	0.91700	0.94387	0.97153
		0	0.97153	1	1.02930
		1	1.02930	1.05946	1.09051
		2	1.09051	1.12246	1.15535
		3	1.15535	1.18921	1.22405
		4	1.22405	1.25992	1.29684
		5	1.29684	1.33484	1.37395
		6	1.37395	1.41421	1.45565
		7	1.45565	1.49831	1.54221
		8	1.54221	1.58740	1.63392
		9	1.63392	1.68179	1.73107
		10	1.73107	1.78180	1.83401
		11	1.83401	1.88775	1.94306
		12	1.94306	2	2.05860
		13	2.05860	2.11893	2.18102
		14	2.18102	2.24492	2.31071
		15	2.31071	2.37841	2.44811
		16	2.44811	2.51984	2.59368
		17	2.59368	2.66968	2.74791
		18	2.74791	2.82843	2.91131
		19	2.91131	2.99661	3.08442
		20	3.08442	3.17480	3.26783
		21	3.26783	3.36359	3.46215
		22	3.46215	3.56359	3.66802
		23	3.66802	3.77550	3.88613
		24	3.88613	4	4.11721
		25	4.11721	4.23785	4.36203
		26	4.36203	4.48985	4.62141
		27	4.62141	4.75683	4.89621
		28	4.89621	5.03968	5.18736
		29	5.18736	5.33936	5.49581
		30	5.49581	5.65685	5.82261
		31	5.82261	5.99323	6.16884
		32	6.16884	6.34960	6.53566
		33	6.53566	6.72717	6.92429
		34	6.92429	7.12719	7.33603
		35	7.33603	7.55099	7.77226
		36	7.77226	8	8.23442

**Tabella C.1** - Centri di frequenze e frequenze cut-off per il calcolo della PSD smussata, espresse in frequenza spaziale  $n$ , come indicato dalla ISO 8608.



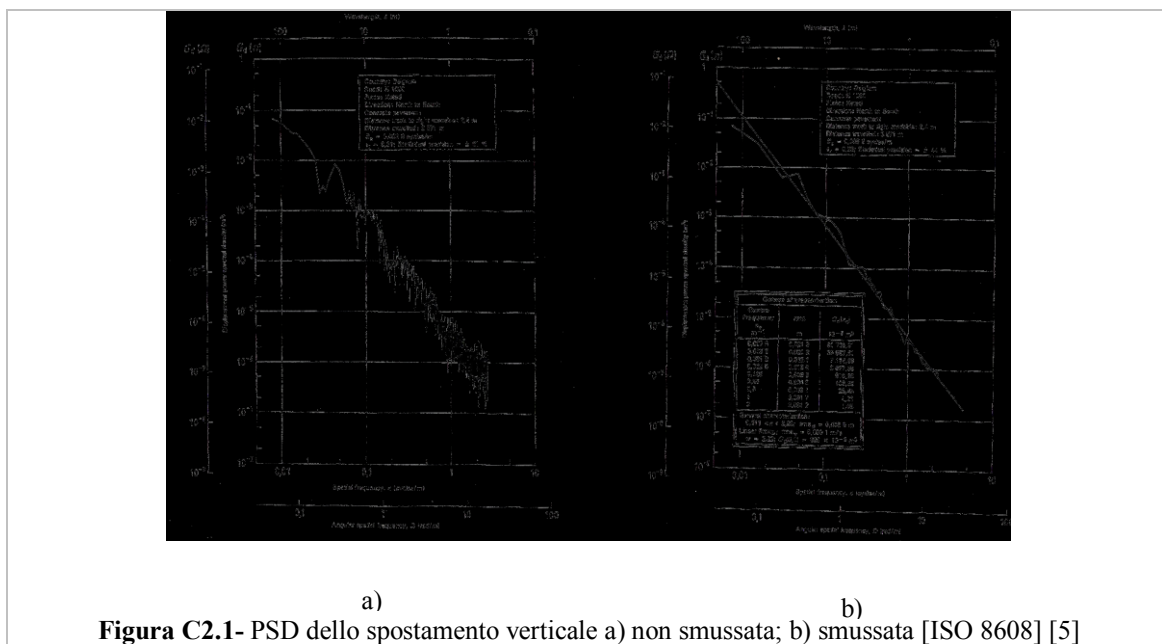
Nota la PSD nella forma smussata, è possibile operare una regressione lineare in un sistema di riferimento bi-logaritmico mediante l'espressione :

$$\ln(G_s) = a + b \cdot \ln(n) \quad 4.$$

che nel sistema di riferimento normale diviene:

$$G_s = e^a n^b \quad 5.$$

dove  $a$  e  $b$  rappresentano le costanti della regressione ricavata sperimentalmente. Operando in tal modo si riesce a collocare meglio la pavimentazione reale fra le otto classi fornite dalla norma. Si riporta in figura 3.3.6, l'esempio proposto dall'ISO 8608 per illustrare il confronto tra la PSD originaria dello spostamento verticale (Figura C1) e la stessa PSD smussata e poi linearizzata nel sistema bi-logaritmico mediante la retta di regressione sui dati ricavati per mezzo dell'operazione di "smoothing".



## **BIBLIOGRAFIA**

- WSDOT –Washington State Department of Transportation- Pavement Guide  
<http://training.ce.washington.edu/WSDOT/>.
- Haas R, Hudson WR, Zaniewski J (1994). 'Modern Pavement Management'. Kriger Publishing Company, Malabar, Florida, U.S.A.
- Shahin, M. Y. (1994), 'Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots', Chapman & Hall.
- ISO 13473-1 (1997). 'Characterization of pavement texture by use of surface profiles – determination of Mean Profile Depth.
- DeBord K. J., 1995. Runway roughness measurement, quantification and application- the Boeing Method, Boeing Commercial Airplane Group document No. D6-81746.
- Cardoso S. H., 2007. Aircraft-based pavement surface roughness assessment. Proceedings of 86th Transportation Research Board Annual Meeting: p.1-19. TRB Washington D.C..
- I.C.A.O. Airport Services Manual - Part 2 - Pavement Surface Conditions 4th edition (2002). International Civil Aviation Organization Doc 9137P2.
- FAA Advisory Circular 150/5320-12C: Measurement, construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces (2007). Federal Aviation Administration. U.S. Department of Transportation.
- Calauti J., Murrell S., Gerardi T., 2004. Roughness assessment in pavement management at New York metropolitan area airports. Proceedings of 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference: p. 1-12. Atlantic City, New Jersey, USA.
- Hachiya Y., Yin J., Takahashi O., himeno K.(1999). 'Aircraft response based airport pavement roughness evaluation'. J.Materials,Con,Struc, Pavement, JSCE, No 634.
- W. Sayers et S.M. Karamihas – The little book of profile - 1997
- M.W. Sayers – On the calculation of International Roughness Index from longitudinal road profile – TRR n. 1501, Transportation Research Board, 1995;
- Johnson, K. and Cation, K 1992, 'Performance Prediction Development Using Three Indexes for North Dakota Pavement Management System', Transportation Research Board, TRR 1344, Washington, D.C.
- Darter, M (1980), 'Requirement for Reliable Predictive Pavement Models', Transportation Research Board, TRR 766, Washington, D.C;
- SITEB-Associazione Italiana Bitume Asfalto Strade (2000), 'Le Pavimentazioni Aeroportuali', Atti del Convegno, Roma.
- Peter, E., Stephan, L., and Adam, H (1995), 'Performance Models for Flexible Pavement Maintenance Treatments', Transportation Research Board, 74th Annual Meeting, Washington, DC.
- D'Apuzzo M., Nicolosi V., Mattarocci M., (2004), 'Predicting Roughness Progression of Asphalt Pavements by Empirical-Mechanistic Model', Proceedings of the II International SIIV Congress, Firenze.

- D'Apuzzo, M. and B. Festa (2004). 'The evaluation of the evolution of road surface friction: a case study in Naples' district. Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna, Book I, Vienna.
- Festa B., Giuliana G. Nicolosi V.(2008). 'A method for developing preliminary friction deterioration model on runway', Proceedings of the 6th Symposium on pavement surface characteristics - SURF 2008, Portoroz (Slovenija).
- D'Apuzzo M., Nicolosi V.(2008). 'An energy-based approach to predict skid-resistance progression', Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C..
- Barnes Bobby David, (1971), 'Airfield Pavement Maintenance', SB, North Carolina State University, Massachusetts Institute of Technology.
- HoSang V.(1975). 'Field survey and analysis of aircraft distribution on airport pavement'. Report n.FAA-RD-74-36. Federal Aviation Administration.
- Wang S. Y., Chou C.P., Cheng H. J.(2008). 'Effect of Field Aircraft Lateral Distribution Pattern on Required Thickness by FAA Design Method'. Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C..
- D.Brown, W.Liu, T.F.P. Henning, (2010). 'Identifying pavement deterioration by enhancing the definition of road roughness'. NZ Tansport Agency Research Report 430.
- M.W. Sayers, T.D. Gillespie e W.D.O. Paterson (1986). 'Guidelines for conducting and calibrating road roughness measumerents', Number HS-093-587, International Bank for Reconstructions and Development (WB – Technical Paper n.46).
- M.W. Sayers.(1995). 'On the calculation of International Roughness Index from longitudinal road profile'. TRR n. 1501, Transportation Research Board.
- ISO 8608. (2001)– Mechanical Vibration–Road Surface profiles–Reporting of measured data .
- M.W. Sayers et S.M. Karamihas (1996), 'Interpretation of Road Roughness Profile Data'.
- Fernando, E., Rawool, S. (2005). 'Methodology for Detection of Defect Locations in Pavement Profile'. Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C..
- Lebas M., Peybernard J., Carta, V., (1981). 'Méthod de traitement des enregistrements de mesure de densità en continu'. *Bull. Liason Laboratoire des Ponts et Chaussées* n. 114, Juillet-août.
- V. Rouillard, M. Sek, T.Perry,(1996). 'Analysis and Simulation of Road Profiles', Journal of Transportation Engineering.
- B. BruscellaV., Rouillard, , M. Sek, (1999). 'Analysis of Road Surface Profiles', Journal of Transportation Engineering.
- V. Rouillard, B. Bruscella, M. Sek, (2001). 'Simulation of Road Surface Profiles', Journal of Transportation Engineering.
- L.Wei, T.F.Fwa, (2004). 'Characterizing Road Roughness by Wavelet Trasform', Journal of Transportation Engineering.

- R.R.Coifman, Y.Meyer and M.V.Wickerhauser, (1992). ‘Wavelet and multiscale signal processing, Wavelet and their applications, M.B. Ruskai and alii eds. Jones and Barlett.
- A.Graps (1995). ‘An Introduction to wavelets’. IEEE Computational Science and Engineering, Summer 1995, vol. 2, num. 2.
- I. Daubechies, (1992). ‘Ten lectures on wavelets’, SIAM.
- Y. Meyer, (1993). ‘Wavelets: Algorithms and Applications’, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- L.Wei, T.F.Fwa, M:ASCE, Zhao Zhe, (2005). ‘Wavelet Analysis and Interpretation of Road Roughness’, Journal of Transportation Engineering.
- Liu Wie, Zhao Zhe, M.ASCE and T.F.Fwa,(2005). ‘Wavelet Analysis and Interpretation of Road Roughness’, Journal of Transportation Engineering, ASCE.
- A.T. Papagiannakis. H.M.Zelelew, B. Muhunthan, (2007). ‘A Wavelet Analysis of the energy Content in Pavement Roughness an Tryck Dynamic Axle Loads’, Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C..
- M.DApuzzo,G.Giuliana, L.Mancini, V.Nicolosi. (2008). “Modeling roughness progression by measurements of runway surface profiles” VI Congresso Internazionale MAIREPAV 2009 .(Torino).

